

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

**GEOPROCESSAMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL.**

Pedro Emilio Pereira Teodoro

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

BRASÍLIA - DF

2011

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO**

**GEOPROCESSAMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL.**

Pedro Emilio Pereira Teodoro

Monografia apresentada como requisito parcial
para obtenção do Título de Especialista em
Geoprocessamento pelo Instituto de Geociências
da Universidade de Brasília.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

BRASÍLIA - DF

2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO

**GEOPROCESSAMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE
FRAGILIDADE AMBIENTAL.**

Pedro Emilio Pereira Teodoro

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

Nome:

Assinatura

Presidente: Prof. Dr. Ricardo Seixas Brites

Examinadores: Prof. Dr. Edilson Souza Bias

Prof. Ms. Gervásio Barbosa Soares Neto

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força para perseverar na busca pelos meus objetivos, pela saúde que me permitiu correr atrás dos meus sonhos e pela oportunidade de estudar.

A minha família, pelo amor, carinho, educação e apoio incondicional.

A minha esposa, Josiane, pelo amor, paciência e companheirismo nesses anos, que me ajudaram a obter sucesso na vida profissional e pessoal.

Ao professor Ricardo Brites, pela paciência, atenção, cordialidade e orientações nesses meses de trabalho. Muito obrigado!

A toda equipe da Especialização, professores, monitores, colegas e Serjão, pelo conhecimento atenção e amizade.

GEOPROCESSAMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL DA UNIDADE HIDROGRÁFICA SANTA MARIA/TORTO.

Pedro Emilio Pereira Teodoro ⁽¹⁾

Resumo – As características físicas da bacia hidrográfica, juntamente, com os tipos de uso e ocupação da área afetam sua fragilidade ambiental, especialmente, no tocante ao desenvolvimento de processos erosivos e a degradação da qualidade dos recursos hídricos. A situação torna-se ainda mais preocupante quando a área em estudo é responsável pelo abastecimento público de água, como é o caso da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto. Este trabalho tem como objetivo construir mapas de fragilidade ambiental utilizando imagem de média resolução espacial, lógica *fuzzy* e análise multicritério. Além disso, visa avaliar a influência da criação do Parque Nacional de Brasília na manutenção, mitigação ou intensificação da fragilidade ambiental da área de contribuição.

Palavras-chaves: Fragilidade Ambiental, Lógica Fuzzy, Análise Multicritério.

Abstract – The physical characteristic of the watershed associated with the land use type affect your environmental fragility, especially, regarding to development erosion processes and degradation of water resource quality. The emplacement still becomes more troubled when the drainage area is responsible to public water supply, such as the Hydrographical Unity Santa Maria and Torto. This work aims is get maps of environmental fragility using medium spatial resolution image, fuzzy logic and multicriteria analysis. Besides, this study aims to evaluate the influence of the Brasília National Park creation on the maintenance, mitigation or enhancement of the environmental fragility drainage area.

Keywords: Environmental Fragility, Fuzzy Logic, Multicriteria Analysis.

(1) Engenheiro Agrícola e Ambiental, Analista de Infraestrutura do MPOG; Ministério da Integração Nacional, edifício sede da CODEVASF, CEP 70.830-901, Brasília-DF, Brasil. E-mail: emiliopereira_1@hotmail.com

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.	14
Figura 2 - Mapa pedológico (incluindo duas categorias de uso do solo) da Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto (EMBRAPA, 1978).	17
Figura 3 - Mapa geológico da Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto.	19
Figura 4 - Pirâmide de informações (Shields et al, 2002).	21
Figura 5 - Diagrama de Ven ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto <i>fuzzy</i> (à esquerda) e um conjunto booleano (à direita).	29
Figura 6 - Fluxo metodológico para a geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC).....	31
Figura 7 - Histograma dos resultados da avaliação da exatidão do MDEHC.	34
Figura 8 - Fluxograma metodológico para o tratamento dos dados orbitais.	39
Figura 9 - Função de pertinência sigmoidal crescente (Silva, 2010).....	46
Figura 10 - Função de pertinência sigmoidal decrescente (Silva, 2010).....	49
Figura 11 - Função de pertinência linear decrescente (Silva, 2010).	50
Figura 12 - Função de pertinência linear crescente (Silva, 2010).	53
Figura 13 - MDEHC da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.	62
Figura 14 - Classes de declividade da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.	63
Figura 15 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto correspondente as classes de declividade.....	64
Figura 16 - Classes de curvatura horizontal da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto. ..	65
Figura 17 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto corresponde as classes de curvatura horizontal.	66
Figura 18 - Classes de curvatura vertical da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.....	67
Figura 19 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto correspondente as classes de curvatura vertical.	68
Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto..	70
Figura 21 - Distribuição das classes informacionais da Unidade hidrográfica Santa Maria e Torto em função da percentagem ocupada da área total.	71
Figura 22 - Mapa de Fragilidade Ambiental Potencial.....	75
Figura 23 - Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente.	76
Figura 24 - Distribuição das classes de solos nas áreas de maior fragilidade ambiental.	77

Figura 25 - Distribuição das unidades litoestratigráficas nas áreas de maior fragilidade ambiental.	78
Figura 26 - Distribuição das classes de curvatura horizontal nas áreas de maior fragilidade ambiental.	78
Figura 27 - Distribuição das classes de curvatura vertical nas áreas de maior fragilidade ambiental.	79
Figura 28 - Distribuição das classes de uso e ocupação do solo nas áreas de maior fragilidade ambiental (mapa de fragilidade ambiental emergente).....	80
Figura 29 - Distribuição das classes do mapa de fragilidade ambiental emergente localizadas dentro dos limites do Parque Nacional de Brasília.....	81
Figura 30 - Distribuição das classes do mapa de fragilidade ambiental emergente localizadas fora dos limites do Parque Nacional de Brasília.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição classes de solo na Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto (EMBRAPA, 1978).	16
Tabela 2 - Distribuição das unidades geológicas do grupo Paranoá na Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto.....	18
Tabela 3 - Dados estatísticos da avaliação da exatidão do MDEHC.....	33
Tabela 4 - Características dos satélites da série Landsat (EMBRAPA Monitoramento por Satélite).....	37
Tabela 5 - Características do sensor TM do satélite Landsat – 5 (EMBRAPA Monitoramento por Satélite).	37
Tabela 6 - Dados das estações meteorológicas (VALENTIM, 2008).	40
Tabela 7 - Erros de predição das superfícies de interpolação obtidas por diferentes modelos de ajuste.....	43
Tabela 8 - Categorias do Mapa de Uso e Cobertura do Solo com seus respectivos graus de fragilidade ambiental.	47
Tabela 9 - Classes de solos predominantes na área de estudo com respectiva erodibilidade e grau de fragilidade ambiental.	48
Tabela 10 - Classes de curvatura vertical com seus respectivos intervalo de valores e fragilidade ambiental associados.	51
Tabela 11 - Classes de curvatura horizontal com seus respectivos intervalos de valores e fragilidade ambiental associados.	52
Tabela 12 - Unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo com respectivos graus de vulnerabilidade relativa à denudação (Crepani et al, 2001) e de fragilidade ambiental.....	55
Tabela 13 - Escala numérica de importância relativa (INPE, 2005).	56
Tabela 14 - Matriz de comparação pareada e os pesos de importância calculados para os fatores constituintes do mapa de fragilidade ambiental potencial.	58
Tabela 15 - Matriz de comparação pareada e os pesos de importância calculados para os fatores constituintes do mapa de fragilidade ambiental emergente.	59
Tabela 16 - Classes de fragilidade ambiental e os respectivos intervalos de valores propostos.	60
Tabela 17 - Matriz de Confusão (Matriz de Erro).	72
Tabela 18 - Índices de Exatidão.	72

Tabela 19 - Distribuição das classes de fragilidade ambiental potencial na Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.....	74
Tabela 20 - Distribuição das classes de fragilidade ambiental emergente na Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.....	74

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO.....	11
1.1 - Apresentação	11
1.2 – Objetivos.....	13
1.3 – Caracterização da área de estudo.....	14
1.3.1 – Hidrografia	15
1.3.2 – Clima	15
1.3.3 – Pedologia	15
1.3.4 – Geologia	17
1.3.5 – Geomorfologia.....	19
1.3.6 – Parque Nacional de Brasília	20
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 – Indicadores	21
2.2 – Indicadores Ambientais	23
2.3 – Indicadores de gestão dos recursos hídricos.....	25
2.4 – O uso do geoprocessamento na construção dos indicadores ambientais.....	28
3) METODOLOGIA DE TRABALHO.....	31
3.1 – Geração do Modelo Digital de Elevação e Extração de seus Produtos	31
3.2 – Processamento digital e sensoriamento remoto.....	36
3.3 – Interpolação dos dados de erosividade	40
3.4 – Padronização dos Fatores Ambientais	45
3.5 – Ponderação dos Fatores Ambientais e Geração das Cartas de Fragilidade Ambiental.	56
4) RESULTADOS	61
4.1 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e respectivos produtos.	61
4.2 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo.....	69
4.3 – Mapas de Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente.....	74
5) DISCUSSÃO	77
6) CONCLUSÃO.....	82
7) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1) INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

Segundo a lei federal nº 6.938/1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, entende-se como meio ambiente o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas. Com relação ao termo bacia hidrográfica, trata-se de uma compartimentação geográfica natural delimitada por divisores de água que é drenada superficialmente por um curso d'água principal e seus afluentes (SILVA, 2007).

De acordo com Tucci (2004), a bacia hidrográfica é uma unidade geomorfológica fundamental da superfície terrestre, sendo considerada pelos geomorfologistas e hidrologistas como principal unidade fisiográfica do terreno, pois suas características governam, no seu interior, todo o fluxo superficial da água. Constitui, portanto, uma área ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais no meio ambiente por ela definido.

Baruqui e Fernandes (1985) confirmam a importância da bacia hidrográfica como ecossistema adequado para avaliação dos impactos causados pela atividade antrópica, os quais podem acarretar riscos ao equilíbrio e a manutenção da quantidade e qualidade da água, uma vez que estas variáveis estão correlacionadas com o uso do solo.

Qualquer tipo de uso da terra na bacia hidrográfica interfere no ciclo hidrológico, não importando o grau com que esse tipo de uso da terra utiliza ou dependa da água (Rocha et al, 2000). Ao mover-se nos diferentes compartimentos de uma bacia, a água tem sua qualidade alterada, e qualquer modificação nas condições da bacia hidrográfica pode causar alterações significativas na qualidade da água (ARCOVA & CICCIO, 1999).

O atendimento da demanda hídrica dos diversos setores usuários em quantidade e qualidade adequada exige a observância quanto ao ordenamento do uso e ocupação do solo das bacias de drenagem, para mitigação dos processos que geram a degradação dos recursos hídricos.

O uso irracional dos recursos naturais acarreta efeitos deletérios tanto à área rural quanto à urbana. Quanto à área rural, as conseqüências principais se referem à redução da produtividade em decorrência da perda da camada mais superficial do solo (camada mais fértil) e, por conseguinte, o decréscimo da produção e, por extensão, da renda do produtor rural. Enquanto que, na área urbana, nota-se uma restrição da disponibilidade hídrica e a depredação da qualidade desse recurso, demandando assim maiores investimentos no

tratamento da água, além da utilização de novos mananciais hídricos cada vez mais distantes dos centros urbanos a fim de assegurar o abastecimento destes.

No caso do Distrito Federal, a situação é preocupante em virtude da conjugação de dois fatores potencializadores da deterioração da qualidade e redução da disponibilidade dos recursos hídricos: (i) é região de nascentes que contribuem para a formação das bacias hidrográficas dos rios Paraná, São Francisco e Tocantins, sendo caracterizada por cursos d'água de pequena a média extensão com vazões modestas; (ii) expansão descontrolada e desordenada das cidades satélites no entorno das bacias hidrográficas responsáveis pelo abastecimento dos centros urbanos.

Nesse cenário, o planejamento do uso e ocupação do solo, notadamente, nas regiões ambientais mais sensíveis é de extrema relevância para conciliar o desenvolvimento sócio-econômico com o desenvolvimento sustentável do Distrito Federal. Entende-se como desenvolvimento sustentável, termo propalado no mundo principalmente a partir da Conferência das Nações Unidas no Rio de Janeiro (1992), como aquele que atende às necessidades presentes sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações atenderem suas próprias necessidades.

Conforme Macedo (2004), as abordagens de planejamento do uso do solo baseadas em critérios econômicos clássicos têm falhado por não reconhecer o conflito entre as metas de desenvolvimento econômico e a capacidade de suporte dos ecossistemas. Na mesma linha de pensamento Pires (1995, apud MACEDO, 2004), confirma que esse planejamento deve ter a integridade do ambiente como fator determinante e o nível de atividade desenvolvimentista permitida, como a variável dependente.

A Agenda 21, em seu capítulo 18, também ressalta a importância do planejamento e gestão dos recursos hídricos: “A escassez generalizada, a destruição gradual e o agravamento da poluição dos recursos hídricos em muitas regiões do mundo, ao lado da implantação progressiva de atividades compatíveis, exigem o planejamento e manejo integrado desses recursos.”

1.2 – Objetivos

O objetivo geral dessa monografia é elaborar mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto, localizada na região noroeste do Distrito Federal e considerada como a principal área de contribuição para o abastecimento público de Brasília. Como objetivos específicos, têm-se:

- Comparação entre os mapas de fragilidade ambiental potencial e o de fragilidade ambiental emergente da bacia hidrográfica, observando as influências das ações antrópicas na manutenção, intensificação ou mitigação das fragilidades ambientais;
- Análise da influência do Parque Nacional de Brasília na preservação da área de estudo, especialmente, no tocante ao desenvolvimento de processos erosivos e a depreciação da qualidade dos recursos hídricos superficiais;
- Testar o potencial de utilização de imagem de média resolução espacial (sensor TM, satélite Landsat 5), da lógica *fuzzy* e da avaliação multicritério para confecção dos mapas de fragilidade ambiental como instrumentos de apoio ao planejamento territorial.

1.3 – Caracterização da área de estudo

A área de estudo do trabalho é a Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto, que possui uma área de aproximadamente 242,58 km² (24.258 ha), localizada na porção noroeste do Distrito Federal (Figura 1).

A escolha da área ocorreu em decorrência de sua importância estratégica no abastecimento público de água de dois relevantes sistemas de captação da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), os sistemas Santa Maria e Torto, responsáveis pelo abastecimento de 18,7% da população atendida do Distrito Federal. Ambos os sistemas atendem as Regiões Administrativa de Brasília, Lago Norte, Lago Sul, Cruzeiro e Paranoá.

Ressalta-se que cerca de 83,6% da área da unidade hidrográfica encontra-se inserida dentro do Parque Nacional de Brasília, que apesar de proporcionar um maior grau de proteção ambiental, também vem sofrendo pressões antrópicas, sobretudo, dos assentamentos e do lixo localizados nas bordas da unidade de conservação.

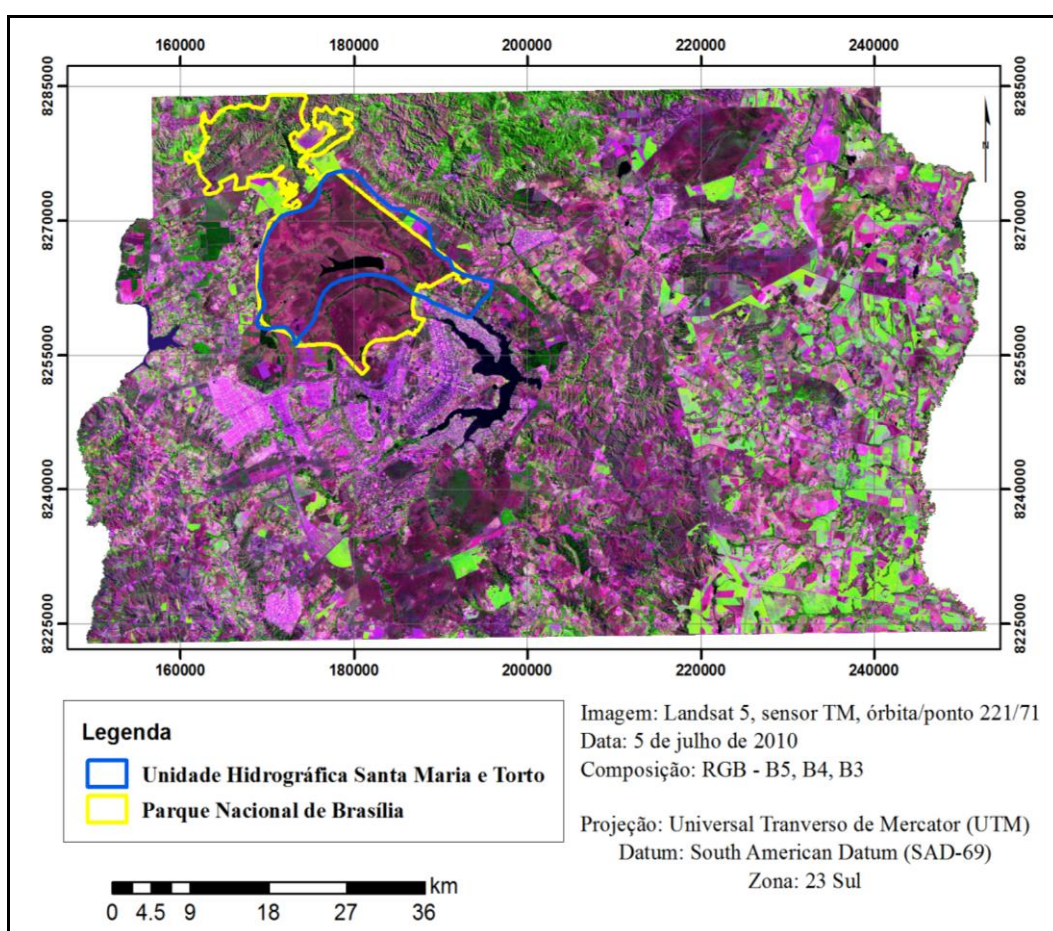


Figura 1 - Localização da área de estudo.

1.3.1 – Hidrografia

A Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto encontra-se inserida dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá e, por extensão, na Região Hidrográfica do Paraná. A área de drenagem dessa região hidrográfica representa cerca de 64% da porção territorial do Distrito Federal, sendo assim de suma importância para o abastecimento público de água da região.

A referida unidade hidrográfica é formada pelos córregos Milho Cozido e Vargem Grande, afluentes do Santa Maria que, por sua vez, é afluente do Córrego Três Barras e este, após sua confluência com o Ribeirão Tortinho, forma o Ribeirão do Torto, que desemboca diretamente no Lago Paranoá (SEMARH-DF, 2001).

1.3.2 – Clima

Conforme a classificação de Köppen, o clima do Distrito Federal é essencialmente tropical (Aw), caracterizando-se pela concentração da precipitação pluviométrica no período de verão e estiagem no inverno, com uma média pluviométrica anual variando entre 1200 e 1800 mm. Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro, com época seca nos meses de inverno, isto é, de junho a agosto. Apesar da variação temporal das precipitações pluviométricas ser marcante no clima do Distrito Federal, não se observa variações significativas dentro da área. Com relação às temperaturas médias mensais, os valores encontram-se entre 13 e 22°C, sendo a amplitude térmica média entre o mês mais frio e mais quente bastante pequena (menor que 5°C).

No Distrito Federal, as diferenças altimétricas são responsáveis pelas variações na temperatura, fato que permite a observação de diferentes tipos climáticos. Dessa forma, na área de estudo nota-se a predominância do tipo Tropical de Altitude (Cwa) com temperatura inferior a 18°C no mês mais frio e superior a 22°C no mês mais quente.

1.3.3 – Pedologia

De acordo com a tabela de distribuição das classes de solos (Tabela 1) e o mapa pedológico (Figura 2) da área de estudo apresentados abaixo, destaca-se a ocorrência das classes Latossolo Vermelho-Amarelo (LVd), Latossolo Vermelho-Escuro (LEd), Cambissolo (Cd) e Solos Hidromórficos (Hi).

Os Cambissolos (Cd) são solos minerais pouco evoluídos, com horizonte B incipiente, sendo bastante variáveis quanto à cor, espessura, textura, estrutura, atividade de argila, dentre outras características. De maneira geral, os cambissolos apresentam teores elevados de silte e uma variação ínfima nos teores de argila em profundidade, resultando em baixa ou até mesmo

inexistente cerosidade, além de uma relação textural próxima a unidade. Como normalmente a ocorrência dessa classe de solo está associada a regiões de declividade acentuada, espera-se que os mesmos, inclusive em função da incipiência de sua formação, possuam maior susceptibilidade à erosão.

Os Solos Hidromórficos (Hi) são formados em condições de hidromorfismo (ambiente de redução), isto é, drenagem deficiente do solo, sendo associados à presença de afloramento do lençol freático e de terrenos planos a suave ondulados.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1978), os Latossolos Vermelho-Escuro (LEd) são solos não hidromórficos, com horizonte A moderado e horizonte B latossólico, de textura argilosa ou média, ricos em sesquióxidos. Além disso, trata-se de solos espessos, muito porosos, bastante permeáveis e fortemente drenados e, por conseguinte, apresentam menor susceptibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Esta classe de solo também se caracteriza por serem álicos, fortemente ácidos, pouco férteis e com fraca distinção entre os horizontes.

Com relação aos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVd), a única distinção entre estes e os Latossolos Vermelho-Escuro (LEd) está associada à cor do horizonte B, que varia entre vermelha e amarela em decorrência da proporção do argilomineral hematita no solo. Além disso, alguns perfis daquela classe de solo também podem apresentar caráter concrecionário e plúntico.

Tabela 1 - Distribuição classes de solo na Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto (EMBRAPA, 1978).

Classes de Solos	Área (km²)	Área (%)
Areias Quartzosas	0,17	0,07
Cambissolo	67,04	27,6
Laterita Hidromórfica Distrófica + Solos Hidromórficos Indiscriminados	4,46	1,8
Latossolo Vermelho-Amarelo	80,82	33,2
Latossolo Vermelho-Escuro	71,8	29,5
Podzol Hidromórfico Álico + Laterita Hidromórfica Distrófica	1,23	0,5
Solos Hidromórficos	8,83	3,6

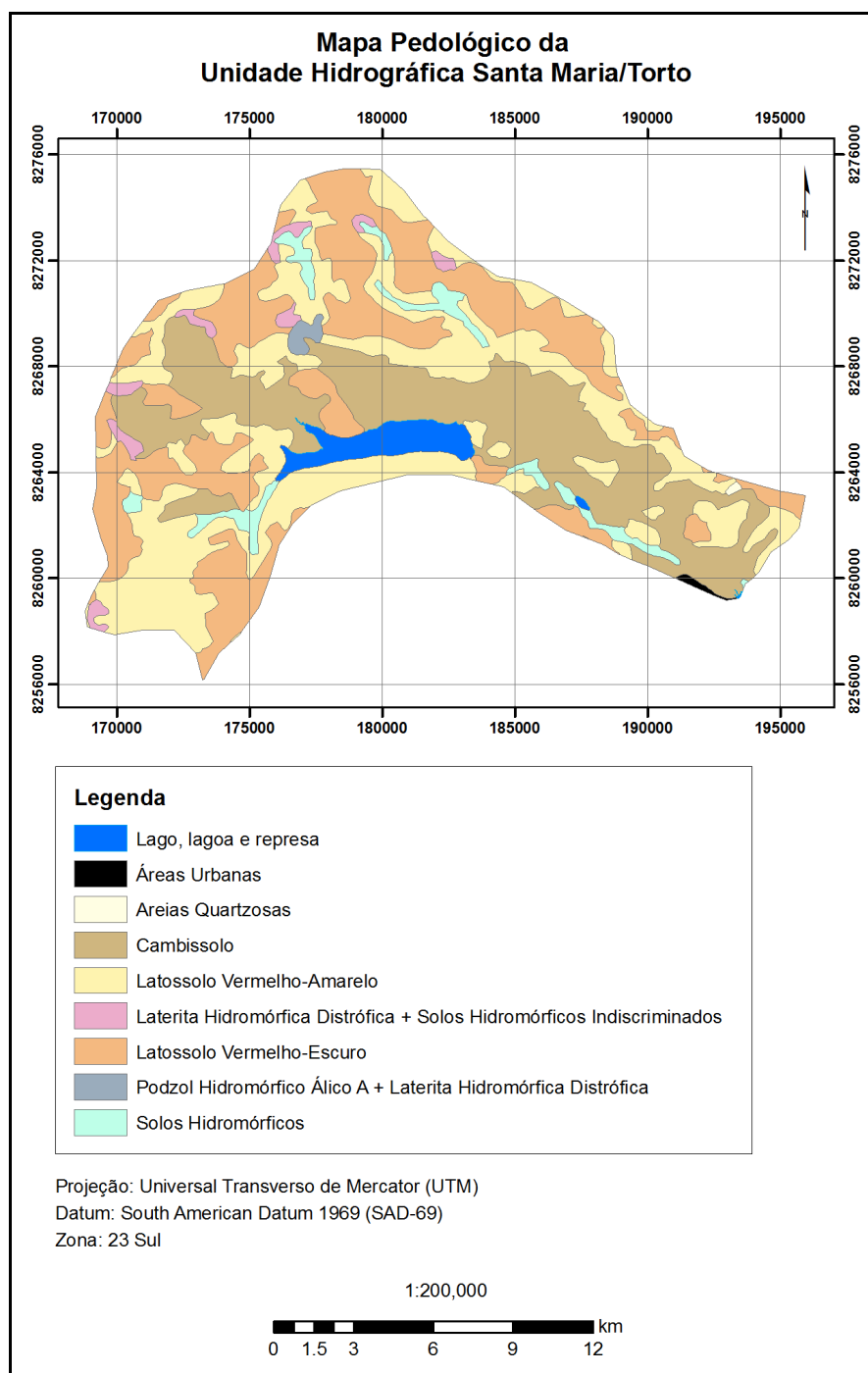


Figura 2 - Mapa pedológico (incluindo duas categorias de uso do solo) da Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto (EMBRAPA, 1978).

1.3.4 – Geologia

A Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto encontra-se integralmente inserida no grupo (contexto litológico) Paranoá, sendo esse grupo responsável por ocupar aproximadamente 65% do território do Distrito Federal.

Dentro dos limites da área de estudo ocorrem rochas atribuídas às unidades A, Q3, R3 e S do grupo Paranoá, conforme mostram a tabela de distribuição das unidades geológicas

(Tabela 2) e o mapa geológico (Figura 3) da unidade hidrográfica. Abaixo segue o nome das referidas unidades e suas características gerais:

- *Ardósias (unidade A)* – constituída por um expressivo conjunto de ardósias roxas, homogêneas, dobradas, com forte clivagem ardosiana e com ocasionais lentes irregulares de quartzitos, que ocupam variadas posições estratigráficas. (SEMARH-DF, 2001)
- *Quartzitos médios (unidade Q3)* – composta por quartzitos, de finos a médios, brancos ou rosados, silicificados e intensamente fraturados. Apresentam estratificações cruzadas variadas e, mais raramente, marcas onduladas. Sustentam o relevo de chapadas elevadas em cotas superiores a 1.200 metros. (SEMARH-DF, 2001)
- *Metarritmito Arenoso (unidade R3)* – caracterizados por intercalações irregulares de quartzitos finos, brancos e laminados com camadas de metassiltitos, metalamitos e metassiltitos argilosos com cores cinza-escuras, quando frescos, que passam para tons de rosados a avermelhados, quando próximos a superfície. (SEMARH-DF, 2001)
- *Metassiltitos (unidade S)* – unidade composta por metassiltitos maciços e metarritmitos arenosos em direção ao topo da seqüência. Localmente, podem ocorrer camadas de quartzitos estratificados e mais raramente são observados, em poços, lentes de metacalcário micrítico cinza. (SEMARH-DF, 2001)

Tabela 2 - Distribuição das unidades geológicas do grupo Paranoá na Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto.

Unidade do Grupo Paranoá	Área (km²)	Área (%)
Ardósias (MNPpa)	2,2	0,9
Quartzitos Médios (MNPpq3)	79,1	32,6
Metarritmito Arenoso (MNPpr3)	134,0	55,1
Metassiltitos (MNPps)	27,7	11,4

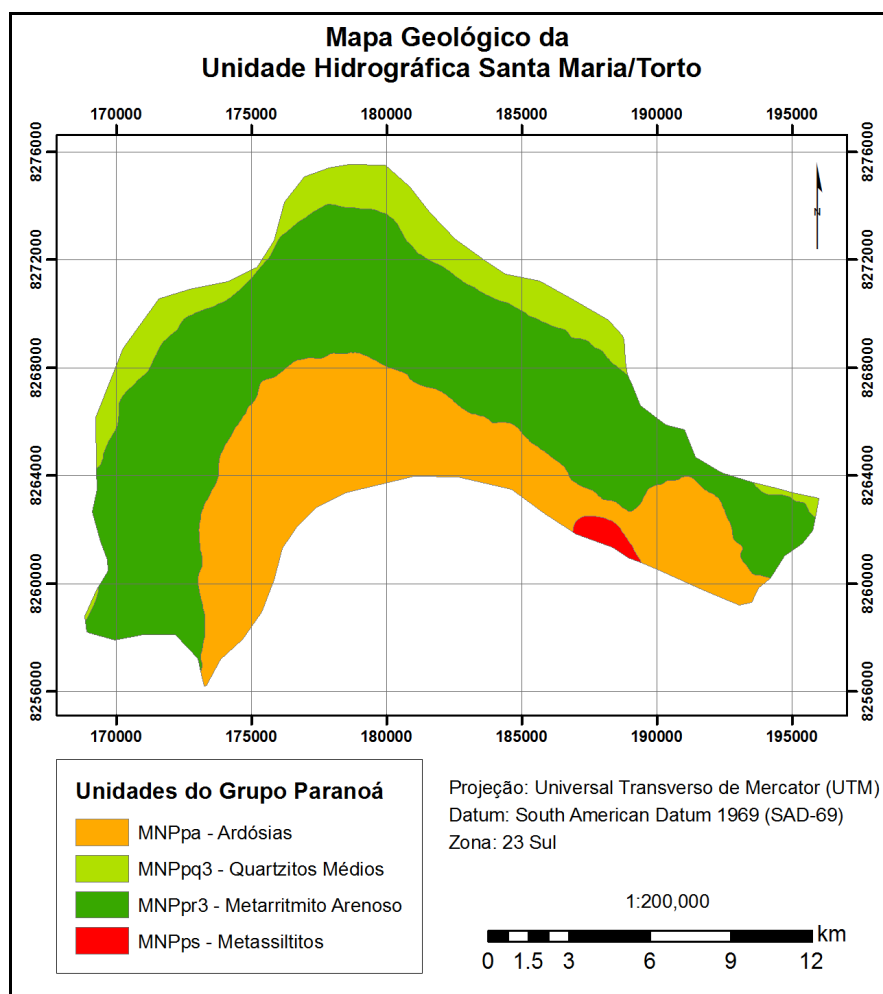


Figura 3 - Mapa geológico da Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto.

1.3.5 – Geomorfologia

O padrão de relevo da bacia do lago Paranoá, onde se insere a área de estudo, é fortemente controlado pelo substrato rochoso e pela estruturação tectônica. No primeiro caso, as rochas mais resistentes aos processos de denudação (intemperismo + erosão), unidades litológicas Q3 e R4, são responsáveis pela manutenção de chapadas e terrenos mais elevados; enquanto que, as rochas mais susceptíveis aos processos de alteração e transporte, unidades S, A e R3, resultam em regiões mais rebaixadas. O controle tectônico é evidenciado no padrão semicircular das zonas de chapadas e no controle do padrão de drenagem, ora apresentando forma semi-anelar, ora apresentando forma semi-retangular, ambas controladas por dobras e fraturas (CARNEIRO E SOUZA, 2001).

1.3.6 – Parque Nacional de Brasília

Segundo a Lei Federal nº 9.985/2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), o Parque Nacional tem como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, permitindo a realização de pesquisas científicas, o desenvolvimento de atividades de educação ambiental e turismo ecológico, sendo essa espécie de unidade de conservação de posse e domínio públicos.

O Parque Nacional de Brasília (PNB) é uma Unidade de Conservação Federal, criado nos primórdios da construção da nova capital federal pelo Decreto Federal nº 241/1961, com cerca de 30 mil hectares, tendo seus limites redefinidos pela Lei Federal nº 11.285/2006, contando atualmente com uma área de aproximadamente 42,2 mil hectares.

O objetivo principal da criação do Parque foi a preservação dos recursos hídricos das bacias do ribeirão do Torto/Santa Maria e do Rio Bananal para o abastecimento público da cidade de Brasília.

Entretanto, no caso específico da Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto, ainda existe uma área de 39,77 km² (correspondendo a aproximadamente 16,4% da extensão territorial da referida unidade hidrográfica) fora dos limites de proteção do Parque Nacional, acarretando sérias ameaças a manutenção da qualidade e da disponibilidade dos recursos hídricos que abastecem os sistemas de captação localizados nessa área de contribuição.

Segundo a classificação de Ribeiro & Walter (1998, apud ROVERATTI, 2008), são registrados para o PNB seis fitofisionomias, quais sejam: mata de galeria, mata seca, cerrado *sensu stricto* (com os subtipos típico, denso, ralo e rupestre), campo sujo, campo limpo (com os subtipos úmidos e com murundus) e campo cerrado com *Trembleya*. Entretanto, apesar da manutenção da cobertura vegetal da unidade de conservação, observam-se a ocorrência de fatores que põem em risco a integridade e comprometem a biodiversidade do Parque, tais como situação fundiária, invasão do entorno, lixo e introdução de espécies exóticas.

Atualmente, as principais atrações do Parque são as piscinas de águas correntes e os passeios pelas trilhas que permitem conhecer a fauna e flora locais.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Indicadores

Segundo a pirâmide de informações adaptada de Shields et al (2002), da base para o ápice da figura geométrica ocorre uma agregação gradual das informações do sistema, onde a base, a faixa intermediária e a superior correspondem aos dados primários do monitoramento, aos indicadores e aos índices, respectivamente. Entretanto, segundo o IPEA/PNUD (1998), “um índice envolve o problema da ponderação dos indicadores, o que, em última instância, envolve algum juízo de valor. Significa dizer que os pesos atribuídos aos indicadores não são neutros e envolvem, necessariamente, a introdução de algum nível de arbítrio”. Na figura 4 encontra-se a representação da pirâmide de informações do referido autor.

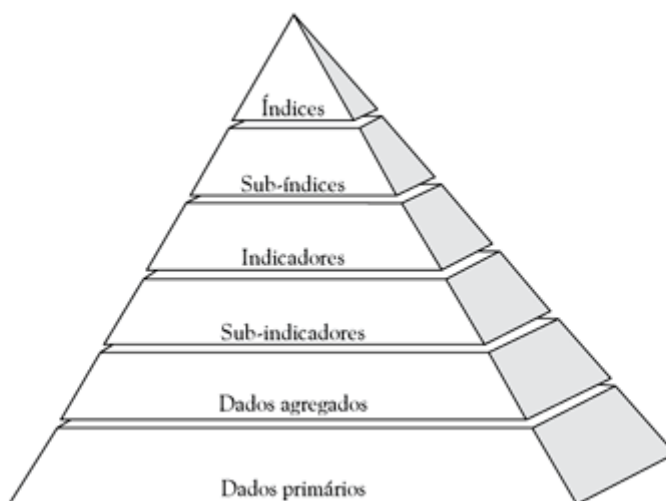


Figura 4 - Pirâmide de informações (Shields et al, 2002).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (1991), indicadores são formas de representação quantificáveis de características de processos e produtos utilizados para acompanhar e melhorar os resultados ao longo do tempo. Deponti et al. (2002, p. 45) relata que se deve compreender o indicador “*como um instrumento que permite mensurar as modificações nas características de um sistema*”.

Da mesma forma para os autores Noll e Zapf (apud ROCHA, 2008), indicadores têm se apresentado como ferramentas que representam características e propriedades de uma dada realidade (processos, produtos, organizações, serviços, etc.) buscando a otimização de tomada de decisões pelos gestores.

Conforme Camino; Müller (1993, apud DEPONTI et al, 2002), Masera; Astier; Lopez-Ridaura (2000, apud DEPONTI et al, 2002) e Marzall (1999, apud DEPONTI et al, 2002) há algumas características importantes a serem consideradas na definição dos indicadores. O indicador deve:

- ser significativo para a avaliação do sistema;
- ter validade, objetividade e consistência;
- ter coerência e ser sensível a mudanças no tempo e no sistema;
- ser centrado em aspectos práticos e claros, fácil de entender e que contribua para a participação da população local no processo de mensuração;
- permitir enfoque integrador, ou seja, fornecer informações condensadas sobre vários aspectos do sistema;
- ser de fácil mensuração, baseado em informações facilmente disponíveis e de baixo custo;
- permitir ampla participação dos atores envolvidos na sua definição;
- permitir a relação com outros indicadores, facilitando a interação entre eles.

Para que a escolha dos indicadores e índices seja coerente com o propósito de avaliação do sistema, devem-se observar os seguintes pontos:

- Quais são os objetivos e metas da avaliação do sistema?
- Quais são os elementos que constituirão a avaliação?
- E, por fim, como agregar esses elementos para representar de maneira fidedigna a realidade?

Nesse sentido, segundo Bollmann (2001), a ação de mensurar reverte-se em uma ferramenta indispensável para se colocar em prática políticas norteadoras do desenvolvimento humano, auxiliando na percepção dos tomadores de decisão e cidadãos quanto aos aspectos analisados no planejamento dos investimentos a serem realizados com base no estado atual do ambiente em que se pretende atuar.

2.2 – Indicadores Ambientais

O estudo dos indicadores de sustentabilidade ambiental e, mais especificamente, aqueles relacionados aos recursos hídricos foram iniciados somente a partir da década de 1980. Entretanto, só vieram a tomar corpo com a realização da Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente (Rio-92). A proposta era definir padrões sustentáveis de desenvolvimento que considerassem aspectos ambientais, econômicos, sociais, éticos e culturais (Deponti et al, 2002).

Esses indicadores são considerados relativamente novos se comparados com o uso difundido dos indicadores econômicos (Produto Interno Bruto – PIB, por exemplo) e sociais (Taxas de Mortalidade Infantil, Expectativa de Vida, Taxa de Analfabetismo, por exemplo) utilizados a partir da década de 1960.

Em seu capítulo 8, a Agenda 21 brasileira recomenda a adoção de indicadores que meçam as mudanças nas dimensões econômica, social e ambiental, para atingir a integração entre meio ambiente e desenvolvimento econômico-social na tomada de decisões.

Os indicadores de sustentabilidade constituem um sistema de sinais que permitem aos países avaliar seu progresso em gestão ambiental a respeito do desenvolvimento sustentável. Segundo Quiroga (2005), os indicadores ambientais, bem como os econômicos e sociais, possibilitam que se compare uma base comum de informação selecionada e processada, o que facilita a objetividade nos processos de decisão, seu ordenamento, geração e enriquecimento mediante o fortalecimento da participação dos cidadãos.

A Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 1993, p.8) definiu indicadores ambientais como sendo: *“parâmetro ou valor calculado a partir de parâmetros dando indicações ou descrevendo o estado de um fenômeno do meio ambiente ou de uma zona geográfica, que tenha alcance superior à informação diretamente dada pelo valor do parâmetro”*.

Conforme Meirelles et al (2005), os indicadores auxiliam na determinação das alterações no meio ambiente, selecionando medidas chaves, que podem ser físicas, químicas, biológicas ou sócio-econômicas, e que oferecem informações úteis à compreensão do ambiente como um todo. Os indicadores devem ser apresentados de forma a possibilitar análises e avaliações da transformação do meio físico e social, buscando a elaboração e formulação de políticas públicas (MIRANDA e TEIXEIRA, 2004, apud ISAIAS, 2008).

De acordo com Xarxa (2000, apud CORRÊA, 2007), indicadores devem refletir a dinâmica do uso, observando o estado do local em um momento pontual e possibilitando análise evolutiva em escala temporal, com capacidade para orientar a transformação de uma

localidade e formar um ciclo de tomada de decisões em função das tendências verificadas e das metas estabelecidas.

Segundo Magalhães Júnior (2003), a utilização de indicadores é condicionada pela realidade de disponibilidade de dados, pelas prioridades regionais e pelos objetivos de gestão, sejam eles políticos (contexto jurídico) ou científicos.

Conforme Siche et al (2007), de maneira geral índices de sustentabilidade apresentam as seguintes vantagens: (i) avaliação dos níveis de sustentabilidade do ambiente; (ii) capacidade de sintetizar as informações de cunho técnico-científico, facilitando a transmissão das mesmas; (iii) identificação de variáveis-chaves no sistema; (iv) bom instrumento de apoio à decisão e aos processos de gestão ambiental. Entretanto, os mesmos autores também ressaltam as limitações associadas aos índices de sustentabilidade, principalmente, as perdas de informações nos processos de junção dos dados e a complexidade de definir expressões matemáticas para a obtenção do índice final.

Além das limitações supracitadas, Magalhães Júnior (2003, p. 189) também salienta que os indicadores *“podem ser utilizados para confirmar decisões políticas já definidas e jogos de interesse de caráter setorial ou local: a própria escolha do indicador pode envolver, preliminarmente, interesses estratégicos”*. Portanto, os indicadores podem vir a mascarar todas as dimensões das políticas públicas ou do desenvolvimento sustentável, devendo ser sempre analisados por técnicos capacitados e que conhecem a metodologia utilizada no estudo.

2.3 – Indicadores de gestão dos recursos hídricos

A compreensão do recurso natural água como bem econômico e finito por uma parcela da sociedade, além dos conflitos existentes ou emergentes entre os diversos usuários têm provocado uma pressão para que o uso deste recurso busque maximizar o bem-estar econômico e social. A situação se mostra mais preocupante quando os recursos hídricos são destinados ao uso mais nobre: o abastecimento humano. Segundo Sirigate et al (2005), quando os mananciais de superfície têm a finalidade de abastecimento público e passam a fazer parte de um sistema de captação, deve-se examinar cuidadosamente todos os elementos que digam respeito às condições mínimas de qualidade dessa água.

Apesar da importância dos indicadores no gerenciamento dos recursos hídricos, Bayo (1999, apud MAGALHÃES JR., 2003) ressalta que a utilização de indicadores na avaliação da qualidade da água deve levar em conta as dificuldades de delimitação do conceito de qualidade. Tendo em vista que o termo qualidade de água está intrinsecamente relacionado ao uso a que o recurso se destina.

Segundo Domingues (2000), os indicadores para a gestão de recursos hídricos devem possuir as seguintes características:

Pertinência política e utilidade para os usuários:

- deve representar de forma confiável as condições ou o estado do meio ambiente, as pressões, os impactos e as respostas;
- deve ser simples, fácil de interpretar e capaz de simular/prever tendências;
- deve refletir o estado do meio ambiente correlacionado com as ações antrópicas;
- deve servir de referência para comparação e validação na escala de trabalho definida (bacia, território nacional ou internacional);
- deve estar referenciado a um conjunto de valores de significado prático, acessível à compreensão dos tomadores de decisão, gerentes e usuários da água.

Exatidão e análise:

- deve estar referenciado por fundamentos teóricos consistentes em termos científicos, técnicos, socioeconômicos e culturais;
- deve ser aceito por especialistas nacionais e internacionais quanto à sua validade e aplicabilidade;
- pode reportar-se aos modelos econômicos e aos sistemas de previsão usados na tomada de decisões estratégicas.

Mensurabilidade

- deve ser acessível, disponível e resultar de uma relação custo / benefício razoável;

- deve ter validade institucional e social;
- deve ser revisado e atualizado em intervalos regulares.

No caso de bacias hidrográficas, Villela e Mattos (1975) salientaram que as características físicas de uma bacia constituem elemento de grande importância para avaliar seu comportamento hidrológico. Atualmente é reconhecida a grande importância da análise de fatores ligados à drenagem, relevo, geologia, uso do solo e pedologia, para a compreensão da dinâmica ambiental das bacias hidrográficas (VITO, 2007). Desta forma, a análise tem sido realizada para retratar as condições do ambiente (PISSARRA et al, 2004, apud PESCE, 2010) e formular novas abordagens que apontem alternativas para a intervenção do homem na paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1974, apud PESCE, 2010).

Segundo Magalhães Júnior (2003, p. 166):

Os impactos humanos podem ter seus efeitos potencializados em função da fragilidade do meio receptor, da capacidade de absorção dos impactos e de sua capacidade de reversão às condições originais. É importante saber a duração dos efeitos de uma ação sobre o meio e se os efeitos são reversíveis. Por outro lado, a consideração dessas noções não é fácil.

Seguindo essa linha de pensamento, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – USEPA, 2001/2002) propôs um índice para gestão de bacias hidrográficas que considera a noção de vulnerabilidade da água como integrando as características de fragilidade do recurso ou do meio, e de intensidade das forças impactantes (pressão). Magalhães Júnior (2003, p. 118) salienta que “o índice visa refletir a qualidade da água e dos meios aquáticos por meio de indicadores de estado e de vulnerabilidade”.

No Brasil, o uso do Índice de Qualidade de Água (IQA) construído a partir de pesquisas com especialistas na década de 1970, pela National Sanitation Foundation (NSF), dos Estados Unidos, ganhou notoriedade, sendo atualmente utilizado – incluindo suas variações – por diversas companhias de saneamento e agências de proteção ambiental, tais como a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB – SP) e o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM – MG). A escolha dos parâmetros e a ponderação dos mesmos basearam-se na importância relativa de cada elemento para a manutenção ou melhoria da qualidade dos recursos hídricos com fins de abastecimento público. Apesar de propiciar o monitoramento e a avaliação da qualidade de água ao longo da bacia de contribuição e no decorrer do ano, o IQA não é focado em um aspecto crucial que é a indicação das prováveis causas responsáveis pela degradação da qualidade da água.

Em São Paulo, a partir de 2002 a CETESB tem utilizado índices específicos para os principais usos dos recursos hídricos:

- Índice de Qualidade de Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP): índice mais fidedigno da qualidade da água bruta a ser captada, pois além de considerar o IQA, também pondera parâmetros relacionados a toxicidade e características organolépticas da água;
- Índice de Proteção de Vida Aquática (IVA): índice destinado a avaliar a qualidade das águas para fins de proteção da flora e da fauna em geral, por incorporar parâmetros que reflitam a toxicidade e o grau de eutrofização do meio aquático;
- Índice de Balneabilidade: índice destinado a avaliar a qualidade da água para fins de recreação de contato primário, sendo aplicado em praias de águas interiores, localizadas em rios e reservatórios.

Quanto aos indicadores e índices relacionados aos recursos hídricos, nota-se uma tendência de os mesmos seguirem uma lógica normativa no Brasil, baseada na análise da conformidade da água segundo as exigências regulamentares. Estas exigências são determinadas pela Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde (parâmetros de potabilidade da água) ou pela Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) no que tange ao enquadramento dos cursos d'água.

De acordo com Magalhães Júnior (2003, p. 175):

Em meio a tantas exigências e fatores envolvendo os indicadores, é preciso, antes de tudo ser realista. Os indicadores são potencialmente úteis à gestão das águas, mas podem ser utilizados por um público pouco preparado tecnicamente e pouco informado. Nesse contexto, um dado pode fornecer falsas imagens.

2.4 – O uso do geoprocessamento na construção dos indicadores ambientais

Segundo Câmara et al (2008), o termo geoprocessamento refere-se à disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional.

De acordo com Isaias (2008, p. 48):

O uso de técnicas de geoprocessamento, em que se incluem o sensoriamento remoto e os sistemas de informação geográfica (SIG), constitui-se numa ferramenta de alto potencial para integração e análise de diferentes componentes de um sistema ambiental, permitindo a elaboração de zoneamentos e propostas de manejos específicos, com base no cruzamento de diferentes planos de informação espacial.

A integração da tecnologia SIG com modelos matemáticos de estimativa de perdas de solo por erosão vem sendo aplicada com eficiência no planejamento agro ambiental de microbacias hidrográficas, principalmente no diagnóstico do risco de erosão (CASTRO e VALÉRIO-FILHO, 1994, apud ISAIAS, 2008; MORAES et al, 2000, apud ISAIAS, 2008).

Conforme Câmara et al (2008) os programas de SIG apresentam alta capacidade de associar um banco de dados geográficos com banco de informações cadastrais, na qual estão integradas tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e análise de dados.

Fedra (1993) salienta que o SIG compõe-se de sistema computacionais capazes de capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar e imprimir dados referenciados espacialmente. Esses sistemas contêm dados geométricos (coordenadas e informações topológicas) e atributos que descrevem as propriedades de objetos geométricos como pontos, linhas e áreas.

Segundo Ferreira (1997), os Sistemas de Informações Geográficas podem ser considerados um instrumento para mapear e indicar respostas às várias questões sobre planejamentos urbano e regional, meio rural e levantamento dos recursos renováveis, descrevendo os mecanismos das mudanças que operam no meio ambiente e auxiliando o planejamento e manejo dos recursos naturais de regiões específicas.

O modelo de dados conhecido como conjunto *Fuzzy* tem sido usado com frequência na modelagem dos estudos ambientais, tendo em vista que, segundo Câmara et al (2008), trata-se de “uma metodologia de caracterização de classes, que por várias razões não tem ou não pode definir limites rígidos (bordas) entre classes”, situação característica dos fatores

ambientais (classes de solos, cobertura vegetal, dentre outros). Nesse sentido, Meirelles et al (2005) propuseram uma metodologia para auxiliar no processo de tomada de decisões relativas à mitigação dos impactos erosivos em bacias hidrográficas, através da determinação de áreas prioritárias por meio da lógica *fuzzy*.

A introdução dos conjuntos Fuzzy ocorreu em 1965 por Lotfi A. Zadeh com o intuito de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, situações ambíguas que não eram bem assimiladas pela lógica booleana (composta por dois valores binários, verdadeiro ou falso, com limites rígidos entre eles). A figura abaixo (Figura 5) ilustra a diferença de fronteira entre conjuntos booleano e conjuntos *fuzzy*.

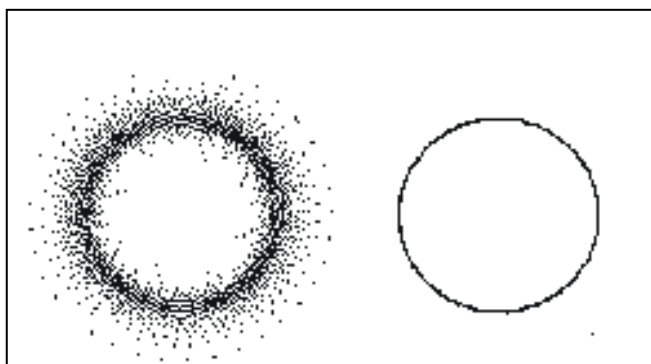


Figura 5 - Diagrama de Ven ilustrando a diferença de fronteira entre um conjunto *fuzzy* (à esquerda) e um conjunto booleano (à direita).

De acordo com Ortega (2001), em última análise, um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência, e o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro de um conjunto *fuzzy*.

As decisões multicriteriais, principalmente as de cunho ambiental, normalmente envolvem o processo de integração de diferentes fatores, sendo o método conhecido como Processo de Hierarquia Analítica (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) o mais difundido. Segundo Câmara et al (2008), AHP é uma teoria com base matemática proposta por Thomas Saaty em 1978, que permite organizar e avaliar a importância relativa entre os critérios e medir a consistência dos julgamentos. Os mesmos autores também ponderam que se trata de “*um processo de comparação pareada, por importância relativa, preferências ou probabilidade, entre dois critérios, com relação ao critério de nível superior*”.

Segundo Forman & Selly (2001, apud LUZ et al, 2006), o AHP obriga decisores a considerar percepções, experiências, intuições e incertezas de modo racional, gerando escalas

de prioridade ou pesos. De acordo com Miara & Oka-Fiori (2007) o método AHP é eficiente por aplicar uma comparação par a par entre as variáveis, considerando assim as diferentes influências exercidas por cada variável física aos processos erosivos dentro da bacia. Para análises de cunho ambiental, o método apresenta desempenho favorável por essa possibilidade de congrega dentro de uma única avaliação um grande número de variáveis.

3) METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 – Geração do Modelo Digital de Elevação e Extração de seus Produtos

Para a confecção do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e extração de seus produtos (declividade e curvaturas) foi utilizado ambiente SIG, envolvendo as etapas de entrada, manipulação, controle e saída dos dados adquiridos, conforme o fluxograma (Figura 6) apresentado abaixo.

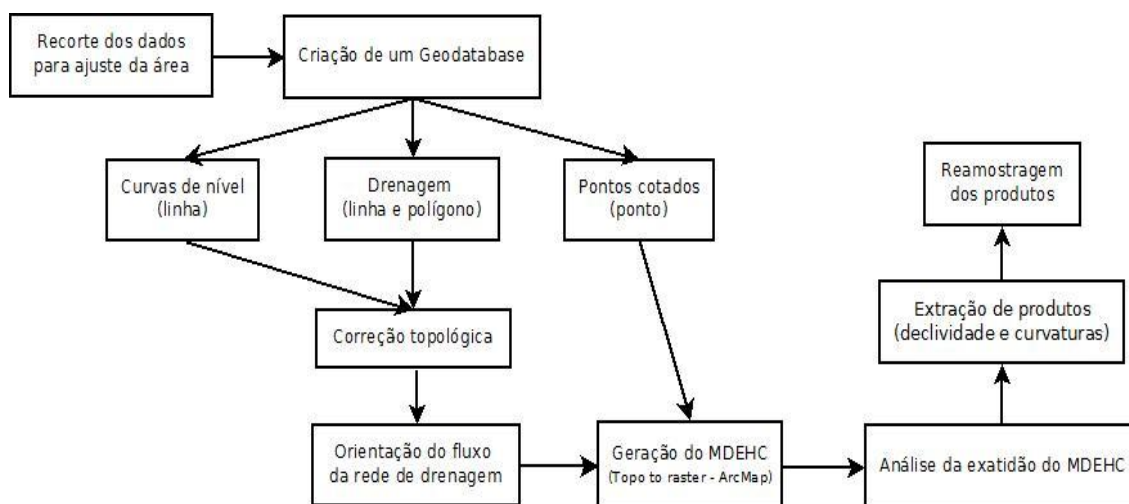


Figura 6 - Fluxo metodológico para a geração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC).

Os dados vetoriais referentes às curvas de nível com equidistância de 5 metros, hidrografia (linhas), hidrografia (polígonos) e pontos cotados foram obtidos por meio magnético junto à equipe do Instituto de Geociências da UnB, originadas da digitalização de cartas topográficas de 1:10.000 (Sicad) e georreferenciados (projeção UTM, datum SIRGAS 2000).

O primeiro passo foi recortar os dados supracitados somente para a região de interesse (Sub-bacia Ribeirão do Torto e adjacências) e convertê-los para o sistema UTM, *datum* SAD-69. Em seguida foi criado um *Personal Geodatabase (ArcCatalog)* que permite armazenar um conjunto de dados com mesmo sistema de referência (vertical e horizontal), mantendo a integralidade dos dados. Os próximos passos foram a criação de um *Feature Dataset (ArcCatalog)*, espécie de repositório das classes de feições, e a importação dos *layers* referente aos dados da curva nível e rede drenagem (hidrografia linha e polígono) para o *Feature Dataset* recém criado.

Após a organização inicial dos dados foi realizada separadamente a correção topológica das curvas de nível e da hidrografia, sendo utilizadas as seguintes regras: *Must Not Overlap*, *Must Not Intersect*, *Must Not Have Dangles*, *Must Not Have Pseudos Nodes* e *Must Not Self-Overlap*. De maneira geral, as regras utilizadas alertam o usuário SIG a respeito de inconsistências nos dados originais, tais como: interseção e sobreposição das feições, existência de pseudo-nós em um mesmo arco, falta de conectividade entre os cursos de água.

Os dados já corrigidos foram exportados como shapefile (projeção UTM, datum SAD 69), sendo então analisada a orientação de fluxo da rede de drenagem e realizadas algumas correções na mesma utilizando a ferramenta *Flip*, que permite a inversão da orientação da feição de linha. Além disso, observou-se a coerência entre os dados de pontos cotados e curvas de nível.

Nessa etapa, foi gerado o MDEHC utilizando-se da ferramenta *Topo to Raster (3D)* do programa ArcGIS com base nos dados de curvas de nível, pontos cotados, hidrografia linha (cursos de água) e hidrografia polígono (lagos e lagoas). Em decorrência da limitação de processamento do computador utilizado, o menor tamanho de célula possível de ser utilizado foi de 5 metros, portanto superior àquele tamanho que seria condizente com a escala dos dados originais, isto é, 2 metros.

Segundo Cuartero et al (2001) a avaliação da exatidão dos modelos digitais de elevação gerados a partir dos diferentes algoritmos de interpolação pode ser realizada por simples reconhecimentos visuais, validações cruzadas baseadas em relações de vizinhança, superposição de curvas de nível e pela comparação estatística com pontos de controle, analisando a inexistência de erros sistemáticos e a presença de erros aleatórios. Nesse sentido, optou-se pelo desenvolvimento de três procedimentos com o intuito de avaliar a qualidade do MDEHC gerado, são eles:

- (i) Comparação visual entre as curvas de nível dos dados originais e aquelas obtidas a partir do MDEHC, ressaltando-se que para extração destas foi utilizado uma equidistância vertical igual a 2,5 metros (metade da equidistância vertical dos dados originais), a fim de avaliar a interpolação realizada. Nesse quesito, constatou-se que as curvas de nível (originais e derivadas do MDEHC) apresentaram-se praticamente coincidentes, além das curvas intermediárias (com espaçamento igual a metade das curvas de nível original) não demonstrarem problemas de interseção com as demais curvas e acompanhar perfeitamente a disposição das mesmas no terreno. Dessa forma,

pode-se concluir que a geração do MDEHC apresentou resultados satisfatórios, inclusive, na interpolação da altitude entre curvas de nível conhecidas.

(ii) A partir dos 3885 pontos cotados originais (pontos de controle), com altitude considerada “real”, e as altitudes dos pontos homólogos extraídas do MDEHC foi realizada uma comparação quantitativa local com o intuito de avaliar a exatidão do modelo digital de elevação gerado, utilizando-se da seguinte equação:

$$ERRO = H_{MDEHC} - H_C \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

H_{MDEHC} : altitude do ponto correspondente obtida do MDEHC;

H_C : altitude “real” do ponto cotado obtida dos dados originais.

Após a realização dos cálculos envolvendo os dados altimétricos dos pontos de controle e dos pontos homólogos do MDEHC foram obtidos os dados estatísticos (Tabela 3). Além disso, foi confeccionado um histograma dos resultados a fim de analisar e avaliar o comportamento da distribuição de frequência dos resultados (Figura 7).

Tabela 3 - Dados estatísticos da avaliação da exatidão do MDEHC.

Variáveis estatísticas	Valores (m)
Média	- 0,06922
Desvio Padrão	0,5384
Valor Máximo	4,0752
Valor Mínimo	- 6,5142

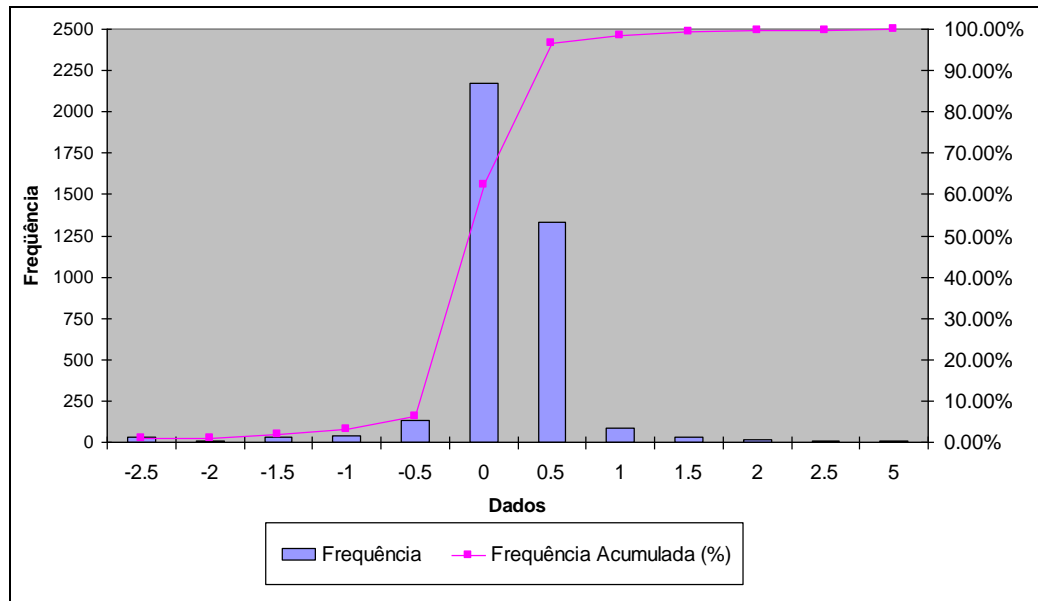


Figura 7 - Histograma dos resultados da avaliação da exatidão do MDEHC.

A partir do histograma apresentado acima, percebe-se que a imensa maioria dos resultados obtidos se encontra na faixa de -1 m a 1 m, isto é, na prática isso significa que aproximadamente 96% dos dados altimétricos dos pontos homólogos obtidos do modelo digital de elevação são “ligeiramente” diferentes dos dados considerados reais. Dessa forma, para os objetivos desse estudo pode-se considerar o MDEHC confiável para análises posteriores.

(iii) Da mesma forma, utilizando-se também dos 3885 pontos cotados originais (pontos de controle), com altitude considerada “real”, e as altitudes dos pontos homólogos extraídas do MDEHC foi realizado o cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMS – *Root Mean Square*) conforme fórmula abaixo (Equação 2), visando verificar a eficiência e o nível de exatidão do interpolador *Topo to Raster* e, por conseguinte, do modelo digital de elevação gerado. Na prática, quanto mais próximo de zero for o resultado do RMS significa que melhor será a previsão do modelo.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (H_{MDEHC} - H_C)^2}{n}} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

H_{MDEHC} : altitude do ponto correspondente obtida do MDEHC;

H_C : altitude “real” do ponto cotado obtida dos dados originais.

Após a realização dos cálculos obteve-se um RMS igual a 0,5219 m, demonstrando a qualidade final do modelo digital de elevação gerado, tendo em vista que o resultado

encontrado foi bastante inferior a um terço da equidistância vertical entre as curvas de nível, que é de 5 metros. Apesar de aparentemente os dados altimétricos apresentarem um padrão de exatidão cartográfica (PEC) compatível a classe A, esta hipótese deveria ser validada por testes estatísticos adicionais.

Após a análise da qualidade do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente gerado, foram extraídos alguns *layers* de informação do mesmo, são eles:

- Mapa de declividade: utilizando-se da ferramenta *Slope (3D)*;
- Mapas das curvaturas horizontal e vertical: utilizando-se da ferramenta *Curvature (3D)*.

Em razão da necessidade da agregação dos *layers* em fases subseqüentes do trabalho, fez-se necessário reamostrar o tamanho da célula dos produtos supracitados de 5 para 30 metros, tamanho este correspondente à pior resolução espacial dos dados utilizados (imagem do sensor Landsat TM). Para isso foi utilizado a ferramenta *Resample (Management)*, juntamente com a opção *Bilinear* na configuração *Resampling Technique*. A opção *Bilinear* realiza uma interpolação bilinear, determinando o novo valor da célula baseado na média ponderada pela distância dos quatro vizinhos mais próximos ao centro da célula de entrada. Esse método de interpolação é útil para dados contínuos e causará uma suavização dos mesmos, entretanto o método não gera células de saída com valores distintos da faixa de valores encontrados nas células de entrada, como ocorre com a técnica de interpolação denominada *Cubic*.

3.2 – Processamento digital e sensoriamento remoto

A elaboração do mapa de uso e ocupação do solo da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto foi realizada com base na imagem da satélite Landsat 5, adquirida em 5 de julho de 2010. A cena utilizada corresponde à órbita/ponto 221/71 e foi obtida pelo sensor TM (*Thematic Mapper*), sendo composta por sete bandas (três na região do visível, uma na região do infravermelho próximo, duas na região do infravermelho médio e uma na região do termal) que oferecem subsídios para o mapeamento temático na área de recursos naturais.

O programa Landsat surgiu no final da década de 1960, como parte do Programa de Levantamento dos Recursos Terrestres da Agência Espacial Norte-Americana (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*), em conjunto com outras agências federais, incluindo o Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*).

O primeiro satélite da série Landsat foi lançado em 1972 (Landsat-1 ou ERTS-1) com as câmaras RBV (*Return Beam Vidicon*) e MSS (*Multispectral Scanner System*) a bordo. O segundo (Landsat-2) e o terceiro (Landsat-3) satélites da série foram lançados nos anos de 1975 e 1978, respectivamente, com alterações no último referente as bandas oferecidas. O Landsat-4 começou a operar em 1982, incluindo os sensores MSS e TM; enquanto que, o Landsat-5 entrou em operação em 1984, estando o sensor TM até hoje em funcionamento. O sexto satélite (Landsat-6) da série foi lançado em 5 de outubro de 1993, entretanto devido a problemas operacionais não conseguiu atingir a órbita. Finalmente, o sétimo e último satélite da série Landsat foi lançado em 1999, incluindo novidades, tais como o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), melhora da resolução espacial da banda 6 (infravermelho termal) de 120 para 60 metros, além de disponibilizar uma banda pancromática com resolução espacial de 15 metros. No entanto, avarias de hardware do satélite verificadas a partir de 2003 acabaram por degradar o imageamento das cenas, demandando correções prévias para seu uso posterior.

Nas tabelas 4 e 5 abaixo se encontram as principais características dos satélites da série Landsat e do sensor TM, respectivamente.

Tabela 4 - Características dos satélites da série Landsat (EMBRAPA Monitoramento por Satélite).

Land Remote Sensing Satellite (Landsat)							
Instituições Responsáveis	NASA (National Aeronautics and Space Administration) e USGS (U.S. Geological Survey)						
País/Região	Estados Unidos						
Satélite	LANDSAT 1	LANDSAT 2	LANDSAT 3	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 6	LANDSAT 7
Lançamento	23/7/1972	22/1/1975	5/3/1978	16/7/1982	1/3/1984	5/10/1993	15/4/1999
Local de Lançamento	Vandenberg Air Force Base						
Veículo Lançador	Delta 900	Delta 2910	Delta 2910	Delta 3920	Delta 3920	Titan II	Delta-II
Situação Atual	Inativo (06/01/1978)	Inativo (25/02/1982)	Inativo (31/03/1983)	Inativo (1993)	ativo	Inativo (05/10/1993)	Ativo
Órbita	Polar, heliossíncrona						
Altitude	917 km	917 km	917 km	705 km	705 km	705 km	705 km
Inclinação	99,2°	99,2°	99,2°	98,2°	98,2°	98,2°	98,2°
Tempo de Duração da Órbita	103,3 min	103,3 min	103,3 min	99 min	99 min	98,9 min	98,9 min
Horário de Passagem	9:30 AM	9:30 AM	9:30 AM	9:45 AM	9:45 AM	10:00 AM	10:00 AM
Período de Revisita	18 dias	18 dias	18 dias	16 dias	16 dias	16 dias	16 dias
Tempo de Vida Projetado	1 ano	1 ano	1 ano	3 anos	3 anos	s.d.	5 anos
Instrumentos Sensores	RBV e MSS	RBV e MSS	RBV e MSS	MSS e TM	MSS e TM	ETM	ETM+

Tabela 5 - Características do sensor TM do satélite Landsat – 5 (EMBRAPA Monitoramento por Satélite).

Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
(B1) AZUL	0.45 - 0.52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
(B2) VERDE	0.50 - 0.60 μm				
(B3) VERMELHO	0.63 - 0.69 μm				
(B4) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.76 - 0.90 μm	120 m	16 dias	185 km	8 bits
(B5) INFRAVERMELHO MÉDIO	1.55 - 1.75 μm				
(B6) INFRAVERMELHO TERMAL	10.4 - 12.5 μm				
(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2.08 - 2.35 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits

As etapas do processamento digital de imagem foram realizadas nos programas ENVI 4.7 e Spring 5.1.7. O primeiro passo consistiu na aquisição das imagens – uma que seria utilizada na classificação do mapa de uso e ocupação do solo e a outra que serviria para obtenção dos pontos de controle terrestres (PCTs) necessários para o georreferenciamento daquela. A primeira imagem foi obtida através do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); enquanto que, a segunda ortorretificada usada como referência, foi obtida do site *Global Land Cover Facility* (GLCF). Apesar da imagem do GLCF apresentar-se ortorretificada e com localização espacial compatível a escala de 1:150.000, não foi possível utilizá-la no processo de classificação, tendo em vista que a cena foi obtida no ano de 2006, portanto considerada desatualizada para o escopo do trabalho.

Como as imagens adquiridas apresentavam as bandas arquivadas separadamente foi necessário agrupá-las utilizando a opção *save file as (ENVI Standard)* do menu *File*. Ressalta-se que a banda 6 (região do infravermelho termal) não foi utilizada no processamento de agrupamento, pois apresenta resolução espacial distinta das demais. Posteriormente, visando enquadrar as imagens na área de interesse, ambas foram recortadas através de um retângulo envolvente definido na ferramenta *Spatial Subset*.

Em seguida baseado na observação do comportamento espectral dos alvos terrestres provavelmente presentes na imagem, foi possível selecionar as bandas que seriam usadas para a composição colorida, permitindo assim a definição e identificação de feições (entroncamento de estradas, intersecções de drenagens, por exemplo) que seriam utilizadas para obtenção dos pontos de controle terrestres.

Posteriormente, utilizando a ferramenta *Select GCPs: Image to Map (menu Map)* a partir de 22 pontos de controle obtidos na imagem GLCF, e configurando como métodos de interpolação das coordenadas e de reamostragem dos valores do pixel um polinômio de primeiro grau e o algoritmo do vizinho mais próximo, respectivamente, foi possível proceder a correção geométrica da imagem (*Datum* WGS – 1984, UTM, Zona 23 Sul). Deve-se ressaltar que o erro médio quadrático (*Root Mean Square Error*) obtido na correção geométrica foi de aproximadamente 0,3920 pixel, sendo considerado aceitável tendo em vista que o valor foi inferior a 1,0 pixel.

A metodologia desenvolvida para gerar o mapa de uso e ocupação do solo, utilizando o programa Spring 5.1.7, baseou-se nas informações espectrais e espaciais dos pixels para o reconhecimento de áreas homogêneas na imagem. A referida metodologia foi subdividida nas seguintes etapas:

- 1) Segmentação da área utilizando a método de crescimento de regiões, que consiste no agrupamento de dados, no qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas. Nesse processo, inicialmente ocorre a rotulação de cada “pixel” como uma região distinta. Em seguida, arbitra-se um critério de similaridade entre regiões, dividi a imagem em um conjunto de sub-imagens e, finalmente, realiza-se a união entre elas, segundo um limiar de agregação definido. Na segmentação da área de estudo foi utilizado o valor único igual a 5 para os parâmetros Similaridade e Área de Pixel;
- 2) Obtenção das amostras de treinamento e de teste, ambas por região, para posterior classificação da imagem e avaliação (Matriz de Confusão e Índices de Exatidão) dos resultados obtidos, respectivamente;
- 3) Classificação da imagem utilizando o algoritmo Bhattacharya (classificador por região), com limiar de aceitação igual 95%. O referido algoritmo realiza a classificação baseado na separabilidade estatística entre um par de classes espectrais, sendo essa separabilidade calculada em decorrência da distância média de Bhattacharya entre as distribuições de probabilidade dessas classes;
- 4) Finalmente, a imagem classificada foi exportada em formato GeoTIFF para o programa ArcGIS, onde ocorreu a transformação da imagem raster em polígonos, agrupamento dos polígonos menores pertencentes a mesma classe informacional e o recorte final da imagem no formato da área de estudo. Os procedimentos para tratamento e classificação dos dados orbitais foram realizados conforme fluxograma (Figura 8).

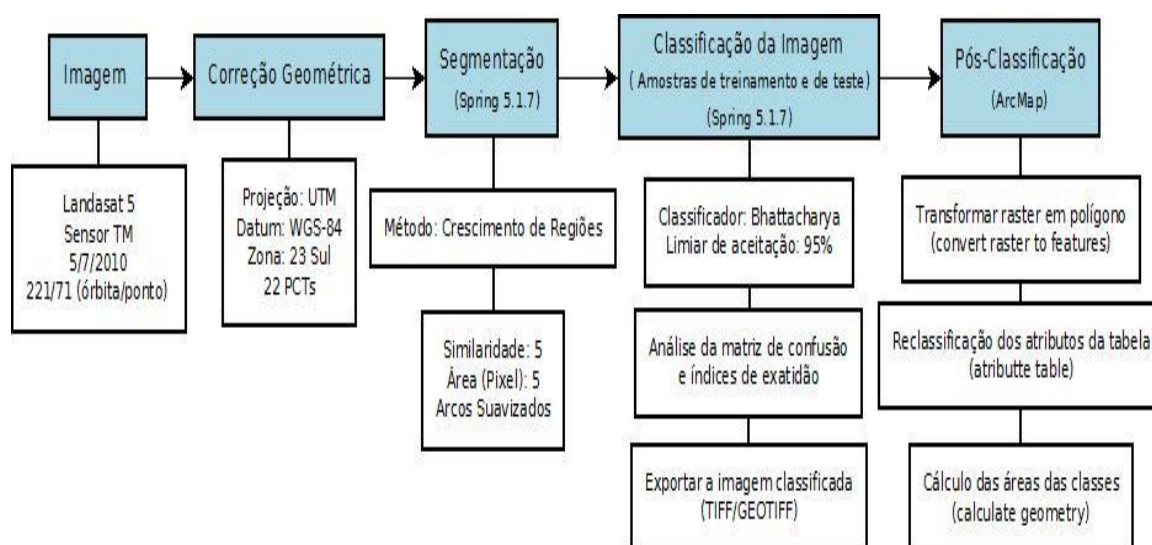


Figura 8 - Fluxograma metodológico para o tratamento dos dados orbitais.

3.3 – Interpolação dos dados de erosividade

Os valores de erosividade foram obtidos dos trabalhos de Valentin (2008). No referido trabalho os cálculos basearam-se nos totais mensais e anuais de precipitação pluviométrica de 38 estações do Distrito Federal e do entorno, pertencentes à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional de Águas (ANA). Na tabela 6 encontram-se o código, o nome, o responsável, as coordenadas planas e o valor de erosividade de cada estação pluviométrica.

Tabela 6 - Dados das estações meteorológicas (VALENTIM, 2008).

Código	Nome	Responsável	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Erosividade (MJ.mm/ha.h)
1547008	ETE Sul	CAESB	188344,7	8229557	6.481,025
1547009	ETE Norte	CAESB	191592,9	8257383	6.477,076
1547010	Contagem	CAESB	191278,1	8267377	7.532,389
1547011	Colégio Agrícola	CAESB	210863,3	8267173	6.723,268
1547012	Papuda	CAESB	215070,9	8233791	7.135,611
1547013	Taquara	CAESB	229721,5	8270173	6.281,923
1547014	Área Alfa	CAESB	181477,5	8231121	7.809,606
1547018	Jockey	CAESB	178732,3	8250281	7.318,851
1547019	Cabeça de Veado	CAESB	195210,2	8241096	6.026,694
1547020	Barragem Paranoá	CAESB	201709,7	8251612	7.524,879
1547021	Barreiro	CAESB	218533	8247184	6.543,438
1547022	Rio Preto	CAESB	239311,5	8252570	6.415,842
1548005	Gama	CAESB	173387,3	8234788	7.363,548
1548006	Taguatinga	CAESB	165903,4	8251540	7.618,769
1548007	Brazlândia	CAESB	156068,8	8263425	8.498,137
1548008	Descoberto	CAESB	153787,6	8252742	7.417,136
1548009	Jatobazinho	CAESB	168453	8260532	7.047,751
1548010	Riacho	CAESB	173976,4	8241351	7.205,686
1547006	Brasília	INMET	185636,9	8252870	7.148,857
1547003	Formosa	INMET	249654,8	8281348	7.712,891
1547016	Principal	EMBRAPA	210372	8275349	6.310,061
1548013	Fazenda Santa Eliza	CAESB	173574	8273376	7.999,284
1548020	Águas Lindas	ANA/CPRM	145645,9	8256925	8.973,745
1547015	Sobradinho	CAESB	198502,1	8266582	6.958,067
1547017	Santa Maria	CAESB	183406,3	8265392	6.170,043
1547030	Laboratório R1	CAESB	188543,9	8253772	6.932,635
1547025	Chapada	EMBRAPA	210383,7	8274426	6.614,946
-	PAD	EMBRAPA	227027,2	8229419	7.179,355
1547026	Roncador	INMET	191226,7	8236334	6.940,955
1647002	Cristalina	ANA/FURNAS	222093,4	8145601	8.479,042
1548001	Mimoso	ANA/FURNAS	160209,7	8332908	7.524,047
1548002	Padre Bernardo	ANA/FURNAS	147628,7	8320353	8.125,548
1548003	Pirenópolis	ANA/FURNAS	76714,73	8243697	8.613,373
1548011	Fazenda Marajá	ANA/FURNAS	116145,8	8277316	7.987,929

1646003	Santo Antônio Boqueirão	ANA/CPRM	316258	8171712	6.916,843
1646004	FazResf	ANA/CPRM	322460,1	8174746	6.922,341
1647008	Fazenda Limeira	ANA/CPRM	261272,4	8206689	7.057,72
1648001	Ponte Anapólis Brasília	ANA/FURNAS	124526,5	8218689	8.292,655

Moraes et al (2010) buscando avaliar os métodos de interpolação dos dados de erosividade da Bacia Hidrográfica do Córrego Monjolo Grande, localizado no estado de São Paulo, comparou três métodos de interpolação distintos, são eles: Krigagem, Inverso ponderado da distância e Mínima Curvatura (*Spline*). Ao final do trabalho, os autores concluíram que o método de interpolação conhecido como Krigagem apresentou os melhores resultados, tendo em vista os seguintes aspectos: (i) os dados estimados permaneceram bastante fieis aos dados originais, isto é, não foram diferentes da faixa de valores dos dados originais (amostrais); (ii) obtenção de um maior número de classes, redundando em um melhor detalhamento das características de erosividade da região; (iii) os dados foram estimados sem tendenciosidade.

Montebeller et al (2007) ao utilizar o método de interpolação Krigagem para analisar a variabilidade espacial do potencial erosivo da chuva no estado do Rio de Janeiro, por meio de análise geoestatística, também ressaltam a superioridade do referido método sobre o Inverso do Quadrado da Distância, principalmente, no que tange à melhor precisão, possibilidade de geração de mapas de erros e de correlações com outras variáveis.

Assim sendo, alicerçado em estudos de espacialização da variável erosividade e em características desejáveis do estimador, sobretudo, a não tendenciosidade e a apresentação de uma variância mínima, optou-se por utilizar a Krigagem. Trata-se de um método de interpolação linear recomendável a variáveis regionalizadas que apresentam continuidade e correlação espacial. Além disso, a Krigagem, no momento da estimativa, considera fundamentalmente “distâncias estatísticas” ao invés das distâncias geográficas ou euclidianas, apesar destas estarem implicitamente no modelo através do semivariograma.

A interpolação dos dados de erosividade utilizando técnicas geoestatísticas no programa *ArcGIS* pode ser desmembrada em duas etapas, são elas: (i) análise exploratória dos dados espaciais; (ii) interpolação propriamente dita. A primeira etapa permite ao usuário analisar os dados de diferentes maneiras, possibilitando obter um melhor conhecimento do fenômeno a ser estudado; enquanto que, a segunda etapa, realiza a interpolação embasada nas conclusões obtidas na etapa anterior.

Assim sendo, a etapa correspondente a análise exploratória dos dados espaciais pode ser dividida nas seguintes ações:

- a) Construção e análise do semivariograma dos dados, a fim de avaliar notadamente duas situações: (i) se os dados apresentam dependência (correlação) espacial. Somente quando a resposta é positiva o método geoestatístico é aplicável. Normalmente, situações aparentes de independência espacial podem estar associadas à baixa densidade amostral; (ii) se os dados apresentam alguma tendência ou ausência de estacionaridade, identificável por semivariância com crescimento contínuo sem um patamar definido, pode-se tentar amenizá-la através da remoção da tendência e análise variográfica dos resíduos.
- b) Construção e análise de histograma e de gráficos utilizando-se das ferramentas *Histogram (Geostatistical Analyst)* e *Normal QQPlot (Geostatistical Analyst)*, respectivamente, visando verificar a distribuição normal dos dados, a ocorrência de agrupamentos indesejáveis e de valores anômalos (*outliers*) e, por conseguinte, a avaliação da necessidade de utilizar alguma transformação que aproxime os dados da distribuição normal. Apesar da não utilização do rigor dos testes estatísticos, pode-se inferir que a distribuição dos dados tende a distribuição normal, tendo em vista os seguintes fatores: (i) o valor da média aproxima-se bastante do da mediana (7.270,6 ante 7.164,1); (ii) os valores dos coeficientes de simetria e de curtose iguais a 0,41486 e 2,4858, respectivamente, aproximam-se daqueles atribuídos à distribuição normal, isto é, 0 (zero) e 3 (três). Dessa forma, optou-se por não realizar qualquer transformação nos dados originais de erosividade.
- c) Análise da tendência global dos dados utilizando-se da ferramenta *Trend Analysis (Geostatistical Analyst)*. Ao analisar o gráfico em três dimensões gerado, percebe-se que os dados apresentam uma forte tendência global nas duas direções (leste-oeste e norte-sul) e que a mesma pode ser representada por um polinômio de segunda ordem. Entretanto, como o tutorial do programa (*Geostatistical Analyst Tutorial*) recomenda que as tendências somente devam ser retiradas quando houver justificativas para fazê-lo, isto é, razões que justifiquem a existência das tendências, o que não é o caso, optou-se pela não remoção da tendência observada.

Com relação à etapa correspondente a interpolação propriamente dita, optou-se por utilizar o método de interpolação denominado Krigagem Ordinária (*Ordinary Kriging*), tendo em vista que a média (constante) dos dados não é conhecida, bem como não é possível determiná-la utilizando uma função determinística (função polinomial), tal como ocorre na Krigagem Universal (*Universal Kriging*).

Escolhido o método de interpolação, no primeiro momento foi realizada uma análise visual dos modelos de ajuste do semivariograma experimental, juntamente, com o ajuste de alguns parâmetros do estimador, tais como *Lag size*, *Number of lags*, *Nugget* (Efeito Pepita), *Partial sill* (Patamar), *Major range* (Alcance). Entretanto, haja vista a dificuldade de se determinar visualmente o modelo que melhor se ajusta aos dados de erosividade, assim como definir os valores dos parâmetros (à exceção do *Lag size* e do *Number of lags*) que redundarão em uma interpolação confiável, optou-se por avaliar quatro modelos de ajuste (circular, esférico, exponencial e gaussiano) com a determinação automática dos valores dos parâmetros pelo programa.

Com relação ao parâmetro *Lag size*, foi adotado um valor aproximadamente igual à distância média entre os dados amostrais, conforme sugere Isaacs & Srivastava (1989) no caso de dados com distribuição randômica. O referido parâmetro corresponde ao tamanho de uma “classe de distância” dentro da qual os pares dos dados amostrais são agrupados a fim de reduzir o número possível de combinações (no semivariograma), facilitando assim a identificação das correlações espaciais.

Enquanto que o valor do parâmetro *Number of lags* foi obtido baseado na recomendação do tutorial do programa, ou seja, o produto dos valores dos parâmetros *Lag size* e *Number of lags* deve ser menor que a metade da maior distância entre os dados amostrais.

Na tabela 7 encontram-se os valores dos parâmetros estatísticos de erro de predição (*Prediction errors*) das superfícies de interpolação obtidas para cada modelo de ajuste:

Tabela 7 - Erros de predição das superfícies de interpolação obtidas por diferentes modelos de ajuste.

Parâmetros estatísticos	Modelos de Ajuste			
	<i>Circular</i>	<i>Esférico</i>	<i>Exponencial</i>	<i>Gaussiano</i>
<i>Mean</i>	-40.02	-41.49	-48.73	-27.68
<i>Root-Mean-Square</i>	583	584.9	594.2	585.5
<i>Average Standard Error</i>	604.3	602.8	602.4	609.5
<i>Mean Standardized</i>	-0.03051	-0.03411	-0.04457	-0.0132
<i>Root-Mean-Square Standardized</i>	0.9889	1.001	1.028	0.9813

Diante dos erros de predição (parâmetros estatísticos) apresentados na tabela acima, percebe-se que de maneira geral todos os modelos de ajuste testados obtiveram um resultado satisfatório quando da interpolação dos dados de erosividade em virtude dos seguintes fatores: (i) os valores do parâmetro *Mean Standardized* aproximaram-se de zero; (ii) os valores dos parâmetros *Root Mean Square* e *Average Standard Error* foram relativamente próximos e; (iii) os valores do parâmetro *Root Mean Square Standardized* tenderam ao valor unitário.

Porém, ao analisar a possível distribuição normal dos erros padronizados utilizando a ferramenta *Cross Validation Comparison* (opção *QQPlot*), percebeu-se um melhor ajuste do modelo circular à distribuição normal, corroborando assim a adequabilidade do uso da técnica geoestatística de interpolação.

Finalmente, a superfície de interpolação escolhida (modelo de ajuste circular) foi exportada como arquivo raster e, em seguida, recortada a fim de abranger somente a área contígua a região de estudo.

3.4 – Padronização dos Fatores Ambientais

Este trabalho propõe o uso da inferência *fuzzy*, que tem como principal característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes, para gerar os mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente. Segundo Kawakubo et al (2005), a fragilidade potencial de uma área corresponde a vulnerabilidade natural de um ambiente em função de suas características físicas como a declividade e o tipo do solo; enquanto que, a fragilidade emergente, além de considerar as características físicas, contempla também os graus de proteção dos diferentes tipos de uso e cobertura vegetal sobre o ambiente.

Entretanto, para a obtenção desses mapas faz-se necessária uma sistemática de integração de vários fatores que, invariavelmente, possuem escalas de valores e unidades de medidas distintas. Assim sendo, a padronização dos fatores ambientais para uma mesma escala de valores busca amenizar esse problema. No presente trabalho, a referida padronização foi realizada utilizando-se de dois diferentes métodos, quais sejam: (a) a padronização através de funções de pertinência *fuzzy* encontradas no módulo *Decision Wizard* do programa *Idrisi Andes*, isto é, a utilização de curvas (funções) que representam a variação dos valores de cada fator em função da sua influência na fragilidade da área; e (b) a padronização através da reclassificação das categorias (classes) contidas nos fatores ambientais através das ferramentas *Reclass* ou *Edit/Assign* do programa *Idrisi Andes*, segundo características e propriedades que afetam diretamente o grau de fragilidade ambiental da área.

Ressalta-se que o primeiro método (funções de pertinência *fuzzy*) normalmente está associado a dados contínuos, tais como mapas de superfície de distância e declividades; enquanto que, o segundo método (reclassificação das categorias) é usualmente utilizado para dados discretos, por exemplo, mapas de uso e ocupação da terra e classes de solo. Dessa forma, segundo Eastmann (1997), enquanto a maioria dos fatores pode ser reescalada automaticamente usando-se alguma função matemática, o reescalamento de dados discretos para fornecer um índice subjetivo para cada categoria deve ser baseado em algum conhecimento.

Finalmente, os fatores escolhidos para serem utilizados nessa análise, bem como seus respectivos processos de padronização (reescalamento) foram os seguintes:

- 1) *Declividade*: A padronização do fator “declividade” ocorreu em função do volume potencial de escoamento superficial gerado e, por conseguinte, da maior probabilidade de ocorrência de processos erosivos nas encostas. Além disso, valores elevados de declividade estão fortemente relacionados a limiares geotécnicos críticos. Dessa forma, optou-se pela utilização da função de pertinência sigmoideal crescente,

associados aos pontos de controle iguais a 10% e 100%. A escolha da função e dos pontos de controle supracitados se deve aos seguintes aspectos:

- A função de pertinência sigmoidal crescente possui uma taxa incremental (representada pela inclinação de uma reta tangente à função) crescente à medida que se aproxima do segundo ponto de controle, quando ocorre uma estabilização da curva. Assim sendo, as regiões próximas ao primeiro (10%) e ao segundo (100%) pontos de controles apresentam um acréscimo gradual em sua fragilidade ambiental; enquanto que, os valores intermediários de declividade apresentam um incremento abrupto dos correspondentes valores de fragilidade ambiental;
- Segundo Pejon (1992), áreas com declividades superiores a 10% possuem uma condição bastante favorável ao escoamento superficial, justificando assim a escolha do primeiro ponto de controle (10%), cujo valor de fragilidade ambiental teoricamente seria igual a zero. Com relação ao segundo ponto de controle, o valor de declividade escolhido (100%) corresponde a encostas consideradas como Áreas de Preservação Permanente (Lei Federal nº 4.771/1965 - Código Florestal Brasileiro), representando então altíssimo grau de fragilidade ambiental.

Na figura 9 encontra-se uma representação da função de pertinência utilizada para a padronização do fator “declividade”.

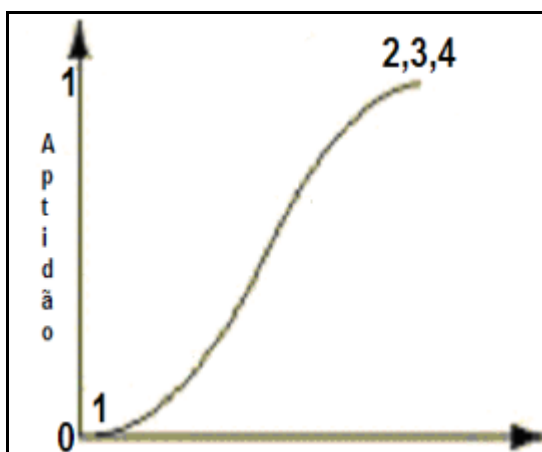


Figura 9 - Função de pertinência sigmoidal crescente (Silva, 2010).

- 2) *Uso e Ocupação do Solo*: A classificação das categorias observadas foi realizada em função de sua capacidade em propiciar a infiltração da água advinda da precipitação e, por conseguinte, a redução do volume de escoamento superficial. Ressalta-se que a manutenção ou melhoria da capacidade de infiltração do solo se deve, principalmente, aos seguintes aspectos: (i) interceptação da precipitação, dissipando a energia (cinética e potencial) associada a esta; (ii) estruturação do solo, favorecendo a formação e a

estabilização dos agregados. Como normalmente esses aspectos se relacionam a regiões com maior cobertura vegetal, categorias que apresentam essa característica foram classificadas com menores graus de fragilidade ambiental, conforme demonstra a tabela 8.

Tabela 8 - Categorias do Mapa de Uso e Cobertura do Solo com seus respectivos graus de fragilidade ambiental.

<i>Categorias</i>	<i>Grau de Fragilidade Ambiental</i>
Área Urbana	240
Solo Exposto	255
Área Agricultada	170
Vegetação Herbácea (Campos)	75
Vegetação Arbustiva (Cerrado)	40
Vegetação Arbórea	10
Corpos Hídricos (Lagos/Cursos de Água)	Restrição

- 3) *Solos*: O critério de padronização utilizado baseou-se na susceptibilidade do solo ao processo erosivo segundo parâmetros físicos, tais como textura, estrutura, profundidade efetiva, existência de camada impeditiva, dentre outros relacionados às características “identificadoras” das classes de solo. Nesse sentido, para embasar a ponderação do grau de fragilidade ambiental foi utilizado o fator de erodibilidade do solo (K), que expressa a susceptibilidade do solo ao processo erosivo, sobretudo, o de origem hídrica. A tabela 9 sintetiza as classes de solos predominantes na área de estudo, juntamente com respectivos valores de erodibilidade e de grau de fragilidade proposto. Quanto ao grau de fragilidade (vulnerabilidade) ambiental percebe-se a ocorrência de dois extremos, são eles: (i) Podzólico Vermelho-Amarelo, com alto grau de fragilidade ambiental, em decorrência da descontinuidade marcante do sistema poroso (drenagem deficiente) provocada pela relação textural elevada entre os horizontais superficial e sub-superficial; (ii) Latossolo Vermelho-Escuro, com baixíssimo grau de fragilidade ambiental, em virtude de ser um solo bastante profundo, bem estruturado e drenado.

Tabela 9 - Classes de solos predominantes na área de estudo com respectiva erodibilidade e grau de fragilidade ambiental.

<i>Classes de Solo</i>	<i>Erodibilidade ⁽¹⁾ [t.h / (MJ.mm)]</i>	<i>Grau de Fragilidade Ambiental</i>
Areias Quartzosas	0,027	140
Brunizem Avermelhado	0,038	225
Cambissolo	0,024	115
Laterita Hidromórfica – Solo Hidromórfico Indiscriminado	0,031	170
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,020	80
Latossolo Vermelho-Escuro	0,013	25
Podzol Hidromórfico Álico A – Laterita Hidromórfica Distrófica	0,021 ⁽²⁾	90
Podzólico Vermelho-Amarelo	0,042	255
Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico	0,030	160
Solos Hidromórficos	0,031	170
Terra Roxa Estruturada	0,013	25

Fonte: ⁽¹⁾ Baptista (1997); ⁽²⁾ Silva *et al* (2007).

4) *Hidrografia*: Inicialmente, a partir da hidrografia (formato *raster*) foi gerada a superfície de distância dos corpos hídricos (cursos de água, lagos e lagoas) através da ferramenta *Distance* do programa *Idrisi Andes*. A padronização dessa superfície de distância apoiou-se na premissa de que áreas contíguas aos corpos hídricos contribuem significativamente com o aporte de sedimentos, matéria orgânica e agrotóxicos, depreciando a qualidade dos recursos hídricos superficiais. Ressalta-se que nesse caso optou-se pelo uso da função de pertinência sigmóide decrescente, com pontos de controle situados em 30 e 500 metros, respectivamente. A escolha da função e dos pontos de controle supracitados se deve aos seguintes aspectos:

- Função sigmoidal decrescente possui uma redução mais gradual na parte inicial da curva, isto é, amplas regiões próximas ao primeiro ponto de controle (30 m) possuirão altos valores de vulnerabilidade (fragilidade) ambiental;

- Os pontos de controle escolhidos (30 m e 500 m) correspondem à faixa mínima e máxima da Área de Preservação Permanente (APP) dos cursos de água (Lei Federal nº 4.771/1965 - Código Florestal Brasileiro). Apesar das faixas referentes à APP serem variáveis em função da largura do curso de água, como a informação é de difícil obtenção preferiu-se a adoção dos valores supracitados como pontos de controle. Assim sendo, valores da superfície de distância entre 0 e 30 metros serão considerados de altíssimo grau de risco ambiental; enquanto que, a partir do valor igual a 500 metros, o grau de fragilidade ambiental tenderá a zero.

A figura 10 representa a função de pertinência utilizada para a padronização do fator “hidrografia”.

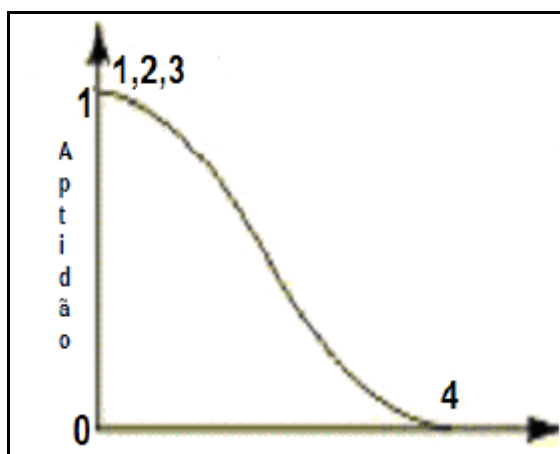


Figura 10 - Função de pertinência sigmoide decrescente (Silva, 2010).

- 5) *Vias Principais*: O processo construtivo de vias de circulação envolve uma série de atividades que impactam negativamente a qualidade ambiental, dentre estas se destacam: o desmatamento, a movimentação de terra, compactação e/ou impermeabilização do solo. Com relação a essas duas últimas atividades impactantes, percebe-se que as mesmas são responsáveis pela concentração do fluxo de escoamento superficial e, por conseguinte, o carregamento de sedimentos aos corpos hídricos adjacentes, juntamente com fertilizantes e agrotóxicos adsorvidos ao complexo sortivo do solo. Conjugado a esse cenário, as atividades de desmatamento e movimentação de terra tendem a agravar o impacto ambiental ao deixar o solo “desprotegido” e desagregado, respectivamente, tornando-o assim mais susceptível aos processos erosivos. Dessa forma, regiões às margens das vias (rodovias e estradas vicinais) tendem a apresentar maior grau de fragilidade ambiental. Assim, inicialmente, a partir do eixo das vias (formato *raster*) foi gerada a superfície de distância utilizando-se da ferramenta *Distance* do programa *Idrisi Andes*. Em seguida, optou-se por utilizar a

função de pertinência linear decrescente para padronizar as unidades de medida, com os seguintes pontos de controle escolhidos arbitrariamente: 90 m e 900 m.

A figura 11 representa a função de pertinência linear decrescente utilizada para a padronização do fator “vias principais”.

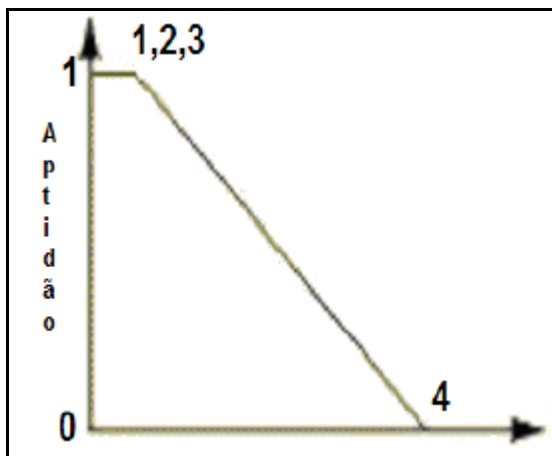


Figura 11 - Função de pertinência linear decrescente (Silva, 2010).

- 6) *Curvatura Vertical*: A curvatura vertical representa o formato da vertente quando observada em perfil, no senso comum seria o caráter convexo/côncavo do terreno. No mapa topográfico seria obtida através da leitura de pelo menos três curvas de nível adjacentes; enquanto que, nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a curvatura vertical seria obtida utilizando-se de janelas móveis que analisam os dados altimétricos das células adjacentes a uma dada célula sob análise.

Segundo Valeriano (2008, p. 38), “*esta variável está relacionada aos processos de migração e acúmulo de matéria através da superfície (sobretudo água), proporcionados pela gravidade*”. O mesmo autor afirma que este mecanismo “*atua indiretamente no equilíbrio entre os processos de pedogênese e morfogênese, além de influenciar a distribuição local do regime hídrico e, conseqüentemente, o regime térmico*”.

De maneira geral, espera-se que encostas de caráter côncavo propiciem maior potencial erosivo do que aquelas de caráter convexo, em decorrência da convergência de fluxo normalmente associado àquela forma de relevo. Portanto, regiões de caráter côncavo apresentarão maior fragilidade ambiental do que as de caráter convexo. Além disso, a classe de curvatura vertical denominada “retilínea” será considerada moderadamente susceptível ao surgimento e desenvolvimento de processos erosivos, sobretudo, os de natureza laminar em vertentes extensas.

Após a fundamentação teórica dos aspectos que nortearão a padronização (reescalonamento) do fator “curvatura vertical”, optou-se por reclassificar o fator em cinco classes. Os intervalos de valores das classes foram definidos com base na análise detalhada da curvatura vertical da área de estudo, especialmente, de regiões com predomínio de caráter côncavo (rede de drenagem e áreas ribeirinhas) e convexo (área entre os cursos de água). Finalmente, na tabela 10 encontram-se as classes de curvatura vertical com suas respectivas faixas de valores e graus de risco ambiental (fragilidade ambiental) associados.

Tabela 10 - Classes de curvatura vertical com seus respectivos intervalo de valores e fragilidade ambiental associados.

<i>Classes da Curvatura Vertical</i>	<i>Faixa da Curvatura Vertical $[(1/100) m^{-1}]$</i>	<i>Grau de Fragilidade Ambiental</i>
Convexidade Franca	$< - 0,015$	30
Convexidade Moderada	$- 0,015 - - 0,001$	80
Retilínea	$- 0,001 - + 0,001$	130
Côncava Moderada	$+ 0,001 - + 0,015$	180
Côncava Franca	$> + 0,015$	255

7) *Curvatura Horizontal*: A curvatura horizontal representa o formato da vertente em projeção horizontal, podendo ser calculada a partir das curvas de nível do mapa topográfico ou a partir da comparação das orientações de vertente dos pixels vizinhos ao local sob análise, no caso de programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). No senso comum, a curvatura horizontal relaciona-se ao caráter divergente (exposição aberta) ou convergente (anfiteatro) das linhas de escoamento.

Dessa forma, espera-se que áreas com caráter convergente possuam um maior potencial erosivo, inclusive, com a formação de ravinas (voçorocas) ao longo da encosta e, por conseguinte, a ocorrência de desmoronamentos e deslizamentos. Com relação as regiões com caráter planar, o escoamento superficial das águas pluviais em encostas extensas e ligeiramente íngremes ensejam a ocorrência da erosão laminar e, subsequente, perda das camadas superficiais do solo (redução da fertilidade) e deterioração da qualidade das águas superficiais dos corpos hídricos adjacentes. Conclui-se que áreas com caráter convergente apresentam maior grau de fragilidade ambiental, seguido pelas de caráter planar e divergente.

No presente trabalho, optou-se por reclassificar o fator em cinco classes, cujos intervalos de valores foram definidos a partir da análise da curvatura horizontal associada à rede de drenagem e a áreas adjacentes, regiões essas representativas da convergência do fluxo na paisagem. Finalmente, na tabela 11 encontram-se as classes de curvatura horizontal com suas respectivas faixas de valores e graus de fragilidade ambiental associados.

Tabela 11 - Classes de curvatura horizontal com seus respectivos intervalos de valores e fragilidade ambiental associados.

<i>Classes da Curvatura Horizontal</i>	<i>Faixa da Curvatura Horizontal $[(1/100) m^{-1}]$</i>	<i>Grau de Fragilidade Ambiental</i>
Muito Convergente	$< - 0,008$	255
Convergente	$- 0,008 - - 0,002$	180
Planar	$- 0,002 - + 0,002$	130
Divergente	$+ 0,002 - + 0,008$	80
Muito Divergente	$> + 0,008$	30

- 8) *Erosividade*: A erosividade das chuvas corresponde à capacidade potencial das mesmas provocarem erosão, sendo o valor normalmente obtido pelo produto entre a energia cinética da chuva e a sua intensidade máxima com duração de trinta minutos. Para fins conservacionistas Bertoni & Lombardi Neto (2008) ressaltam a importância da chuva como um dos principais fatores climáticos responsáveis pela ocorrência da erosão dos solos, devendo ter atenção especial quanto à variável intensidade em detrimento dos totais anuais ou mensais precipitados. Em países tropicais e subtropicais, a chuva tem um papel decisivo no processo erosivo, pois atua na fase inicial do mesmo ao desagregar as partículas do solo, além de transportá-las por salpicamento.

Dessa forma, considerando os demais fatores ambientais constantes, áreas com maiores valores de erosividade apresentam maior grau de fragilidade ambiental, demandando atenção extra quanto ao desenvolvimento e a manutenção de uma cobertura vegetal permanente responsável por dissipar a energia cinética associada à chuva. Assim sendo, optou-se por utilizar uma função de pertinência linear crescente, cujos pontos de controle seriam o menor e maior valor de erosividade encontrado para área de estudo. Ressalta-se que ao menor valor de erosividade foi atribuído um grau de

fragilidade ambiental igual a dez, pois considerou-se que não existem chuvas com potencial erosivo desprezível.

A figura 12 representa a função de pertinência utilizada para a padronização do fator ambiental erosividade.

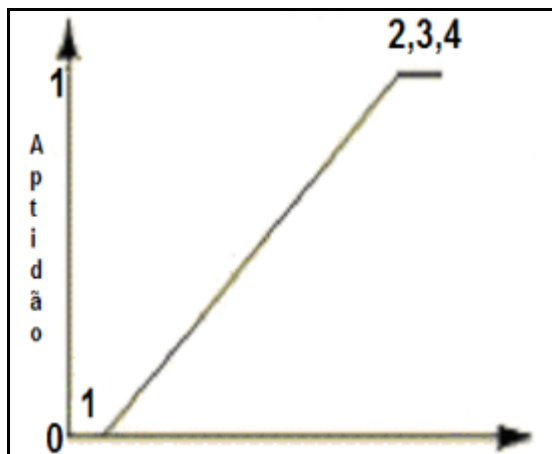


Figura 12 - Função de pertinência linear crescente (Silva, 2010).

9) *Geologia*: O critério de padronização do fator “Geologia” baseou-se na resistência relativa das rochas ao processo de denudação (intemperismo e erosão), dessa forma optou-se por avaliar a susceptibilidade da unidade litoestratigráfica ao processo erosivo a partir de suas rochas constituintes. Sendo assim, utilizando-se da escala relativa e empírica de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns, desenvolvida por Crepani et al (2001), em função das características gerais (especialmente, composição química e estrutura) das rochas buscou-se ponderar as unidades litoestratigráficas presentes na região de interesse (Unidade Hidrográfica Santa Maria/Torto e áreas adjacentes). Finalmente, para embasar a referida padronização segue abaixo uma descrição sucinta das principais unidades litoestratigráficas encontradas na região, incluindo aspectos relacionados à vulnerabilidade aos processos erosivos:

- *Quartzitos médios* – rochas metamórficas compostas basicamente por sílica (SiO_2), consideradas praticamente inertes e, por extensão, mais resistentes ao processo de denudação (menor fragilidade ambiental);
- *Ardósias* – rocha metamórfica com baixo grau de metamorfismo, que apresentam clivagem xistenta, isto é, fácil foliação da rocha em lâminas finas e lisas. Dessa forma, essa unidade litológica tende a apresentar uma menor resistência ao processo de denudação e, por conseguinte, maior fragilidade ambiental.

- *Metassiltitos* – rocha metamórfica com baixo grau de metamorfismo e granulometria mais grosseira do que as ardósias. Por essas razões, os metassiltitos apresentam boa xistosidade (foliações) e, por conseguinte, menor resistência ao processo de denudação (maior fragilidade ambiental). Entretanto, há que se ressaltar que esta resistência é considerada um pouco superior a verificadas nas ardósias.
- *Metarritmito arenoso* – unidade caracterizada pelas intercalações entre quartzitos, metassiltito argiloso, metargilitos silticos e metalamitos. Em razão dessas intercalações, considerou-se que a resistência ao intemperismo e à erosão da unidade litológica, bem como sua fragilidade ambiental, podem ser consideradas moderadas.
- *Filitos* – rocha metamórfica de granulação fina com boa xistosidade (foliação), composta basicamente por micas escuras ($\pm 70\%$) e quartzo ($\pm 30\%$). Em razão de seu maior teor de quartzo e da menor xistosidade, os filitos apresentam uma maior resistência ao intemperismo (menor fragilidade ambiental) do que as ardósias. Ressalta-se que, nesse estudo, considerou-se que a fragilidade ambiental das unidades litológicas filitos e metassiltitos são iguais.
- *Psamo pelito carbonatada* – unidade litoestratigráfica composta por lentes de metacalcários, camadas e lentes de quartzitos pretos e grossos interdigitados com metassiltitos e metargilitos. Em virtude da predominância de rochas com maior vulnerabilidade à denudação, especialmente, calcários, arenitos, siltitos e argilitos, pode-se considerar que essa unidade apresenta a maior fragilidade ambiental dentre as unidades encontradas;
- *Grupo Bambuí* – grupo (conjunto litológico) composto por metassiltitos laminados, metassiltitos argilosos e bancos de arcóseos.

Na tabela 12 encontram-se o nome da unidade, o valor de vulnerabilidade à denudação segundo o trabalho de Crepani et al (2001) e o valor de fragilidade ambiental atribuído em função da susceptibilidade a ocorrência do processo erosivo. Ressalta-se que a escala utilizada pelos referidos autores vai do valor 1,0 (valor próximo a estabilidade) ao 3,0 (valor próximo a vulnerabilidade).

Tabela 12 - Unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo com respectivos graus de vulnerabilidade relativa à denudação (Crepani et al, 2001) e de fragilidade ambiental.

<i>Unidade</i>	<i>Vulnerabilidade relativa à denudação</i>	<i>Grau de Fragilidade Ambiental</i>
Ardósias	2,2	185
Calcifilitos	2,1*	170
Filitos	2,1	170
Grupo Bambuí (metassiltito laminado, metassiltito argiloso e bancos de arcóseos)	2,2**	185
Metarritmito Arenoso	1,8***	120
Metarritmito Argiloso	1,8***	135
Metassiltitos	2,1	170
Psamo-Pelito Carbonatada	2.7 ****	255
Quartzitos Médios	1,0	10

Observações:

* Valor de vulnerabilidade relativa à denudação igual ao valor atribuído a rocha filito;

** Valor de vulnerabilidade relativa à denudação igual à media aritmética simples dos valores atribuídos as rochas metassiltitos e arenitos (principal constituinte da arcósea);

*** Valor de vulnerabilidade relativa à denudação igual à média aritmética simples dos valores atribuídos as rochas quartzitos, metassiltitos e metargilitos (rochas constituintes das unidades Metarritmitos);

**** Valor de vulnerabilidade relativa à denudação igual à média aritmética simples dos valores atribuídos as rochas calcários, argilitos, siltitos e arenitos quartzosos (rochas constituintes da unidade Psamo Pelito Carbonatada).

3.5 – Ponderação dos Fatores Ambientais e Geração das Cartas de Fragilidade Ambiental.

A ponderação dos fatores ambientais consiste em estabelecer uma importância relativa entre o fator (físicos e antrópicos) baseado no conhecimento do usuário sobre a situação e a área em análise. Entretanto, segundo Miara e Oka-Fiori (2007), a ponderação torna-se uma tarefa impossível de ser exata quando se concebe o ambiente como um sistema aberto e dinâmico, carregando assim uma carga indissociável de subjetividade.

Nessa etapa, o método utilizado foi o da comparação par a par denominado Processo de Hierarquia Analítica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), que consiste na elaboração de matrizes de comparação dos fatores que influenciam a tomada de decisão, sendo atribuído um critério de importância relativa (pesos) aos relacionamentos entre esses fatores, conforme uma escala pré-definida. Na tabela 13 é apresentada a escala proposta pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2005) e que será utilizada neste trabalho.

Tabela 13 - Escala numérica de importância relativa (INPE, 2005).

Intensidade de Importância	Definição e Explicação
1	Importância igual – os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada – um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial – um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada – um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema – a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre julgamentos – possibilidade de compromissos adicionais

Com base na comparação, a AHP pondera todos sub-critérios e os critérios e calcula um valor de razão de consistência entre 0 e 1, com o valor zero indicando a completa consistência do processo de julgamento (CÂMARA et al, 2008). A razão de consistência

corresponde à probabilidade de que as comparações tenham sido geradas aleatoriamente. Dessa forma, recomenda-se que o seu valor seja inferior 0,10 e, caso ocorram valores superiores a este torna-se necessária a revisão nas comparações realizadas. Neste estudo, os valores de consistência dos mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente foram de 0,02 e 0,03, respectivamente, sendo ,portanto considerados aceitáveis.

No presente trabalho, a ponderação dos fatores ambientais (físicos e antrópicos) foi realizada no módulo *Weight* do programa *Idrisi Andes*, fornecendo ao usuário um conjunto de pesos de fatores e um valor para a razão de consistência. O módulo permite um processo interativo de exploração, no qual o usuário tem a possibilidade de realizar diferentes experimentos com relação à atribuição de pesos (EASTMAN, 1995).

Nas tabelas 14 e 15 encontram-se as matrizes de comparação pareada e os pesos de importância calculados para os fatores constituintes dos mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente, respectivamente. Ressalta-se que o mapa de fragilidade ambiental potencial é resultado da integração dos fatores declividade, solos, geologia, curvatura vertical, curvatura horizontal, hidrografia (superfície de distância dos corpos hídricos) e erosividade. Enquanto que, o mapa de fragilidade ambiental emergente, além dos fatores já citados, inclui aqueles diretamente relacionados à ocupação antrópica, quais sejam: (a) mapa de uso e ocupação do solo; (b) vias principais (superfície de distância das estradas vicinais e rodovias).

Tabela 14 - Matriz de comparação pareada e os pesos de importância calculados para os fatores constituintes do mapa de fragilidade ambiental potencial.

		FATORES AMBIENTAIS							PESOS DE IMPORTÂNCIA CALCULADOS
		<i>Declividade</i>	<i>Solos</i>	<i>Geologia</i>	<i>Curvatura Vertical</i>	<i>Curvatura Horizontal</i>	<i>Hidrografia</i>	<i>Erosividade</i>	
FATORES AMBIENTAIS	<i>Declividade</i>	1	X	X	X	X	X	X	0,2698
	<i>Solos</i>	1	1	X	X	X	X	X	0,2698
	<i>Geologia</i>	1/3	1/3	1	X	X	X	X	0,1135
	<i>Curvatura Vertical</i>	1/3	1/3	1	1	X	X	X	0,1135
	<i>Curvatura Horizontal</i>	1/3	1/3	1	1	1	X	X	0,1135
	<i>Hidrografia</i>	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	X	0,0954
	<i>Erosividade</i>	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1	0,0246

Tabela 15 - Matriz de comparação pareada e os pesos de importância calculados para os fatores constituintes do mapa de fragilidade ambiental emergente.

		FATORES AMBIENTAIS									PESOS DE IMPORTÂNCIA CALCULADOS
		<i>Uso e Ocupação da Terra</i>	<i>Declividade</i>	<i>Solos</i>	<i>Geologia</i>	<i>Curvatura Vertical</i>	<i>Curvatura Horizontal</i>	<i>Hidrografia</i>	<i>Vias Principais</i>	<i>Erosividade</i>	
FATORES AMBIENTAIS	<i>Uso e Ocupação da Terra</i>	1	X	X	X	X	X	X	X	X	0,3202
	<i>Declividade</i>	1/3	1	X	X	X	X	X	X	X	0,1681
	<i>Solos</i>	1/3	1	1	X	X	X	X	X	X	0,1681
	<i>Geologia</i>	1/5	1/3	1/3	1	X	X	X	X	X	0,0759
	<i>Curvatura Vertical</i>	1/5	1/3	1/3	1	1	X	X	X	X	0,0759
	<i>Curvatura Horizontal</i>	1/5	1/3	1/3	1	1	1	X	X	X	0,0759
	<i>Hidrografia</i>	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	X	X	0,0656
	<i>Vias Principais</i>	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1	X	0,0328
	<i>Erosividade</i>	1/9	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0,0173

Após o cálculo dos pesos de importância dos fatores ambientais, procedeu-se a integração dos mesmos utilizando-se do módulo *Multi Criteria Evaluation – MCE* (procedimento *Weighted Linear Combination – WLC*) do programa *Idrisi Andes*. O referido procedimento calcula o grau de fragilidade ambiental de cada pixel como a média ponderada dos valores atribuídos a cada fator, além de oferecer a possibilidade dos fatores compensarem integralmente uns aos outros, isto é, não existe um segundo conjunto de pesos (pesos de ordenação) que controla o nível global dessa compensação. Dessa forma, um fator com alto grau de fragilidade ambiental (as margens de uma rodovia, por exemplo) para uma área qualquer pode ser completamente compensado por um baixo grau de fragilidade em outro fator (região praticamente plana, por exemplo). Finalmente, calculada a média ponderada pelo procedimento WLC, o resultado intermediário é multiplicado pelas restrições booleanas (em nosso caso, os corpos hídricos) visando eliminar as áreas que, teoricamente, não entrarão na análise.

Confeccionados os mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente, os mesmos serão reclassificados utilizando-se a ferramenta *Reclass* do programa *Idrisi Andes*, a fim de melhorar o aspecto visual dos mapas e facilitar a comparação entre os mesmos. Na tabela 16 encontra-se o nome das classes e os respectivos intervalos de valores propostos.

Tabela 16 - Classes de fragilidade ambiental e os respectivos intervalos de valores propostos.

Classes de Fragilidade Ambiental	Intervalo de Valores
Muito Baixa	0 – 50
Baixa	50 – 100
Média	100 – 150
Alta	150 – 200
Muito Alta	200 - 255

4) RESULTADOS

4.1 - Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) e respectivos produtos.

O mapa mostrado na figura 13 representa o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) gerado a partir da ferramenta *Topo to Raster* do programa ArcGIS. Percebe-se que a área de estudo apresenta uma faixa de variação altimétrica considerável de cerca de 300 metros. Além disso, os dados estatísticos do MDEHC apontam para uma altitude média e desvio padrão iguais a 1.160,67 e 68,68 metros, respectivamente.

Com relação à declividade da área de estudo, nota-se uma predominância de regiões com relevo plano a suave ondulado conforme demonstram o mapa das classes de declividade (Figura 14) e o gráfico de distribuição das classes de declividade em função da área (Figura 15). Deste gráfico percebe-se que cerca de 72% da área da unidade hidrográfica (exceto lagos e lagoas) possui uma declividade inferior a 8%, isto é, uma relevo com topografia suave e, por conseguinte, um menor grau de fragilidade ambiental com relação a esse fator.

No que tange ao produto “curvatura horizontal”, observou-se que os valores concentram-se na classe planar, conforme evidenciam o mapa das classes de curvatura horizontal (Figura 16) e o gráfico de distribuição das classes de curvatura horizontal em função da área (Figura 17). Este comportamento geomorfológico da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto denota uma fragilidade ambiental moderada com relação ao fator “curvatura horizontal”.

Quanto ao produto “curvatura vertical”, o respectivo mapa (Figura 18) e o gráfico de distribuição das classes de curvatura vertical em função da área (Figura 19) permitem observar que os valores concentram-se na classe retilíneo, com aproximadamente 87% da área (exceto lagos e lagoas) correspondente a referida classe. De maneira análoga ao produto “curvatura horizontal”, esse predomínio da classe retilíneo na área de estudo configura uma situação de fragilidade ambiental moderada segundo o reescalonamento definido no item “Metodologia”.

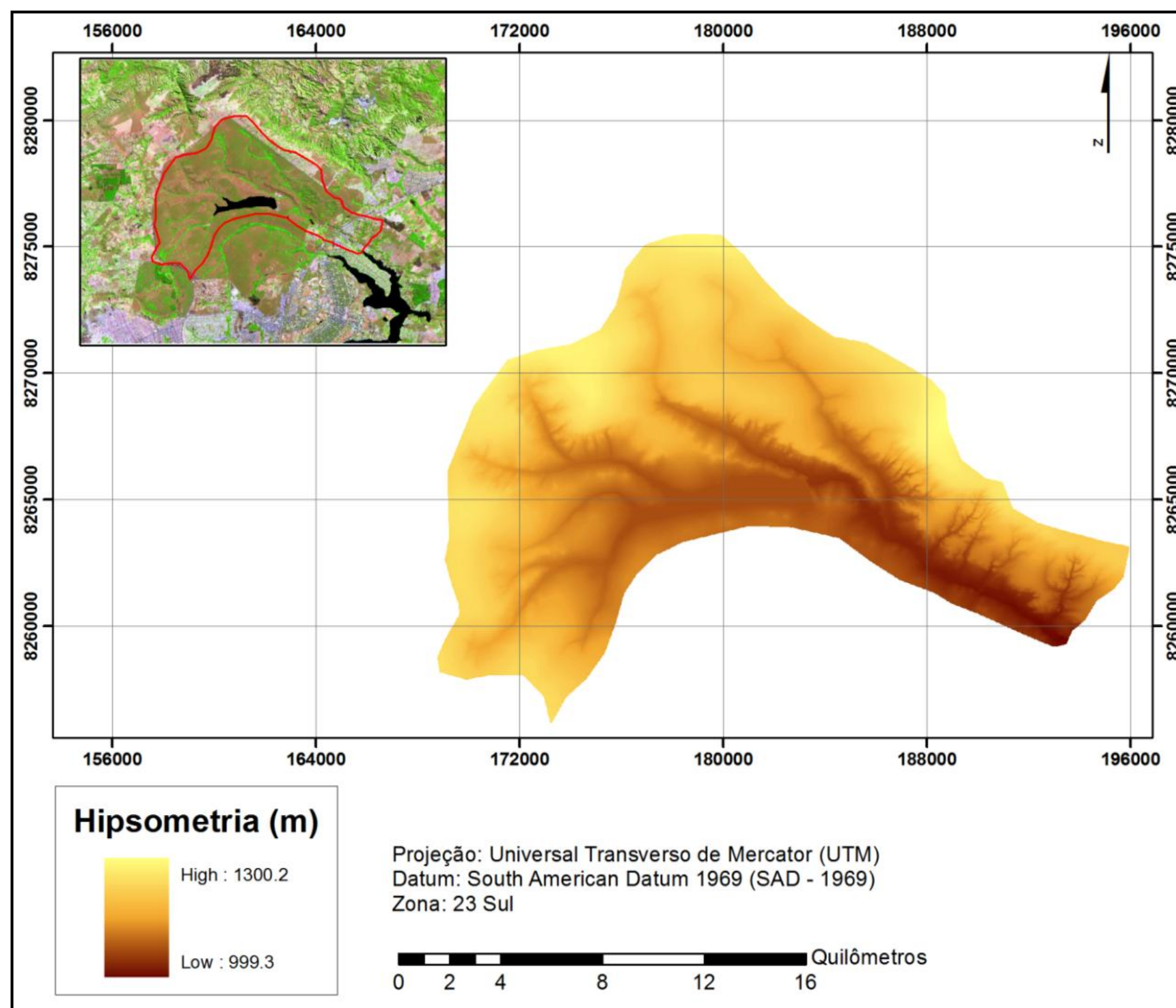


Figura 13 - MDEHC da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

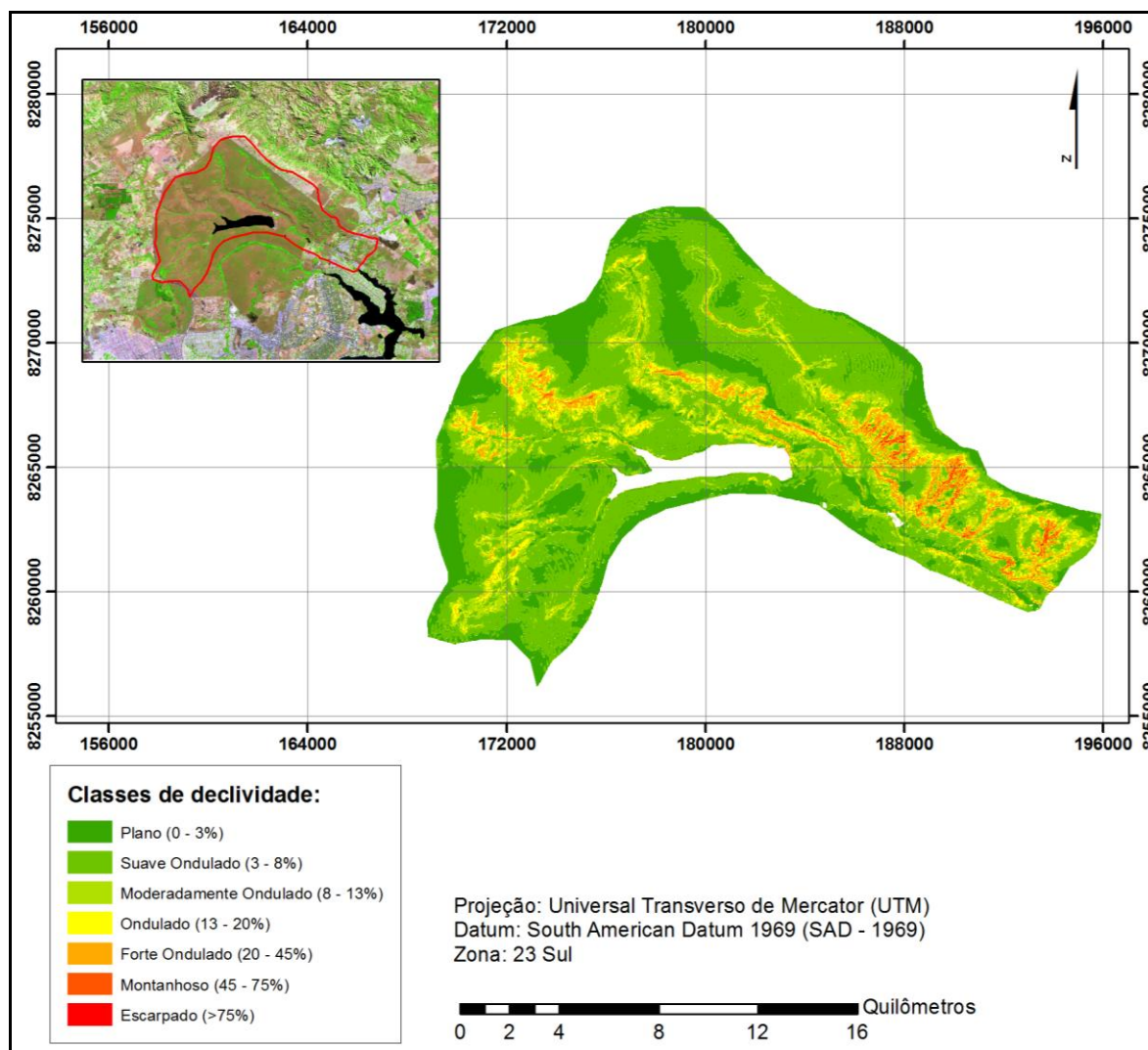


Figura 14 - Classes de declividade da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

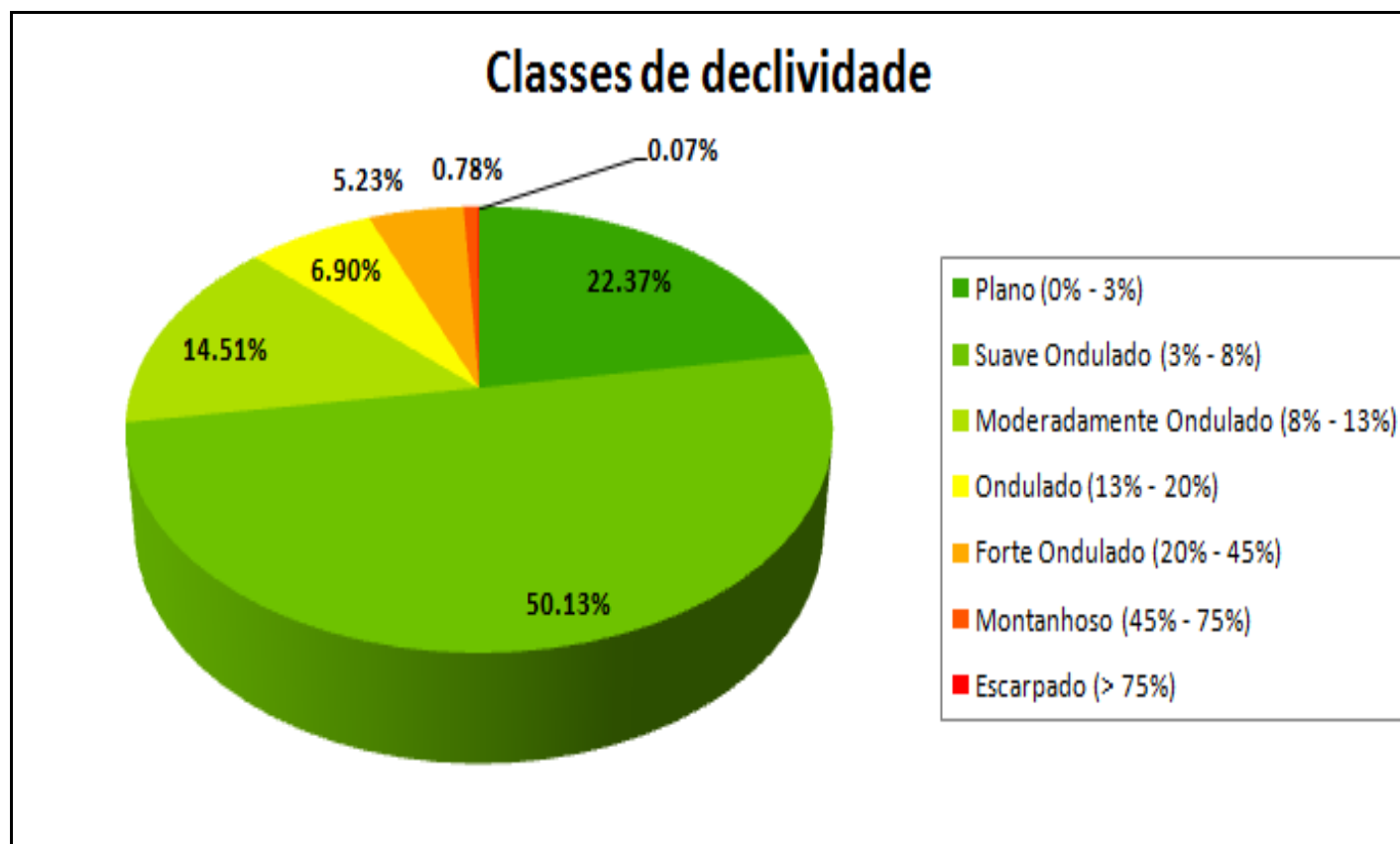


Figura 15 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto correspondente as classes de declividade.

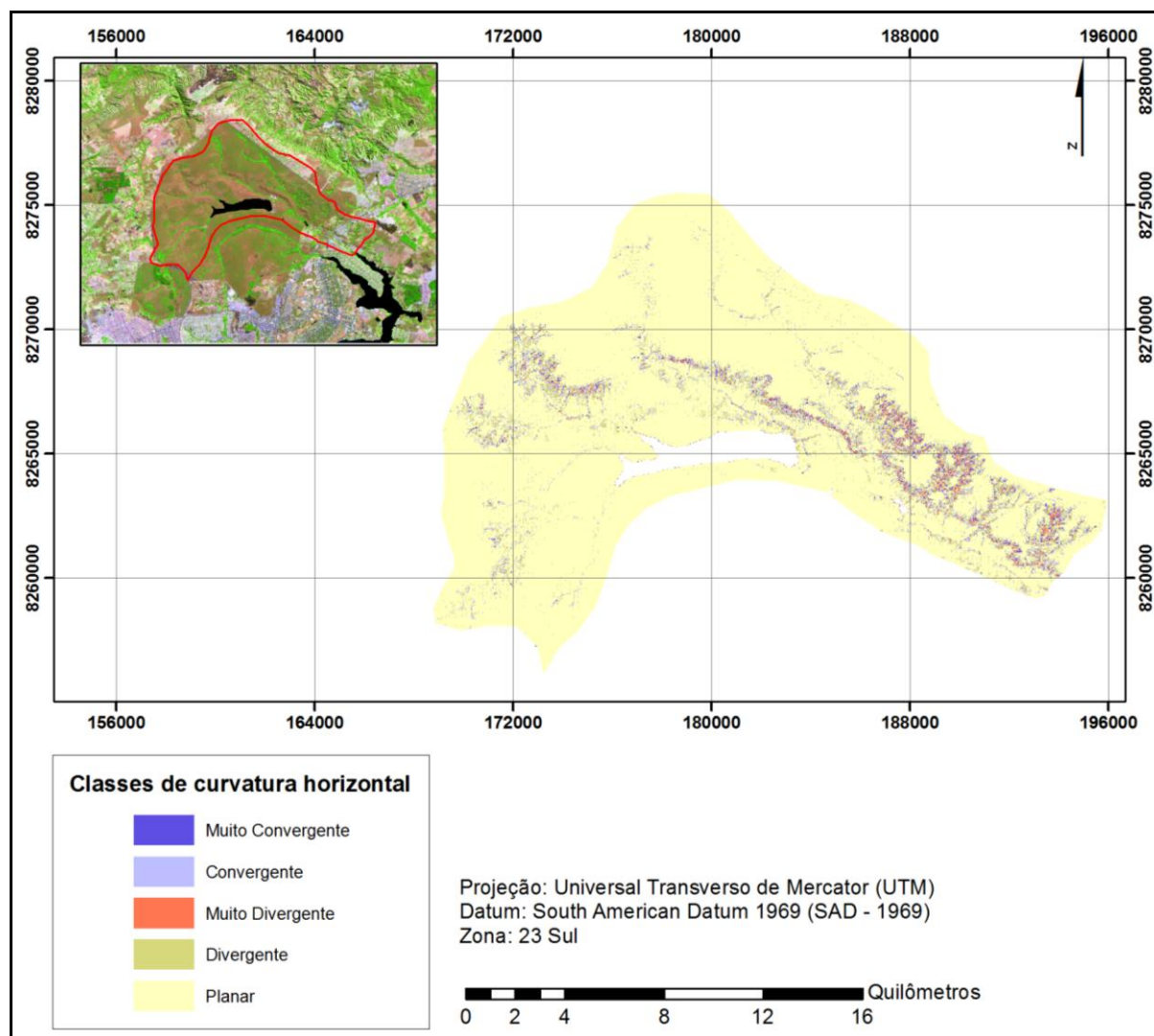


Figura 16 - Classes de curvatura horizontal da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

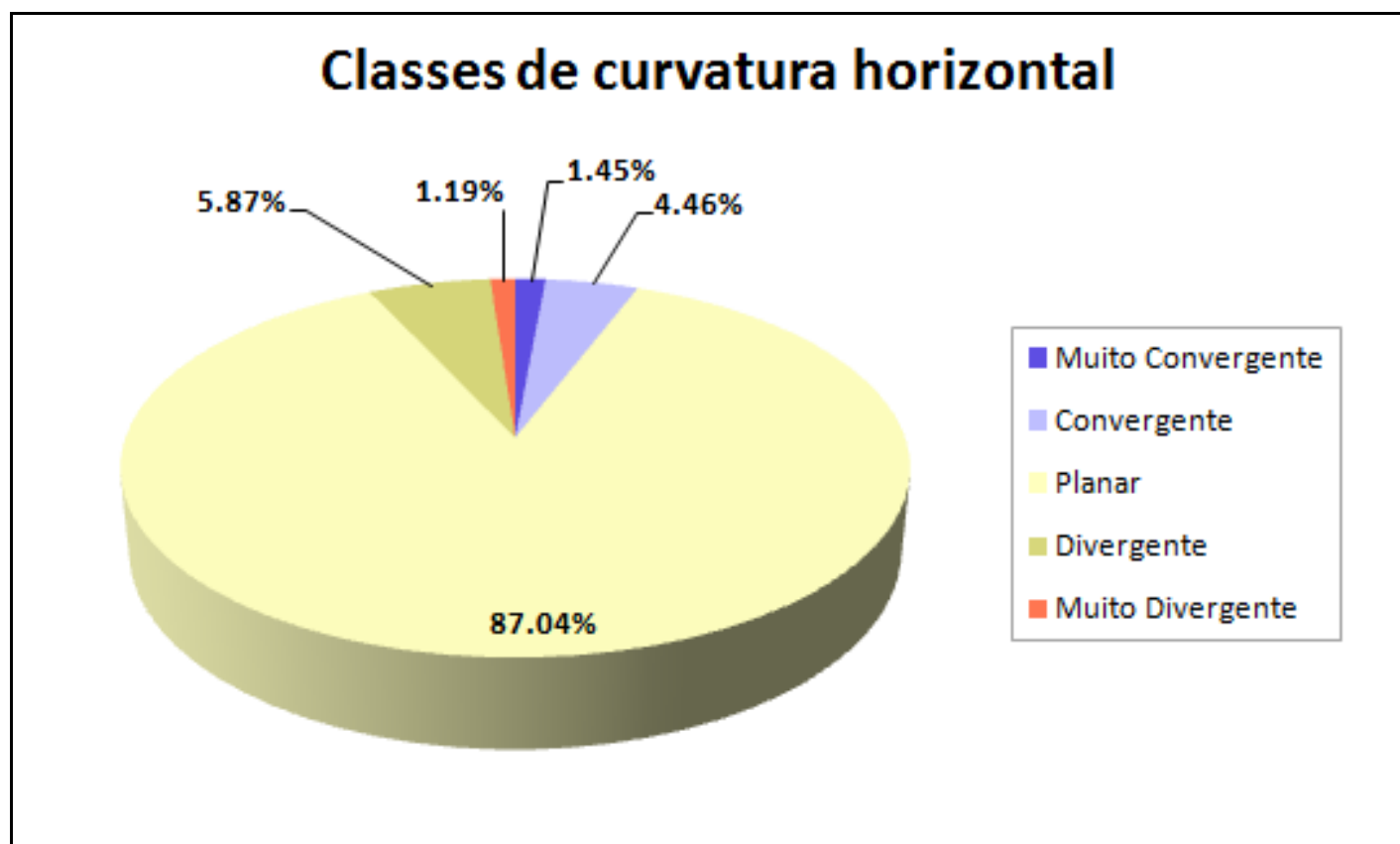


Figura 17 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto corresponde as classes de curvatura horizontal.

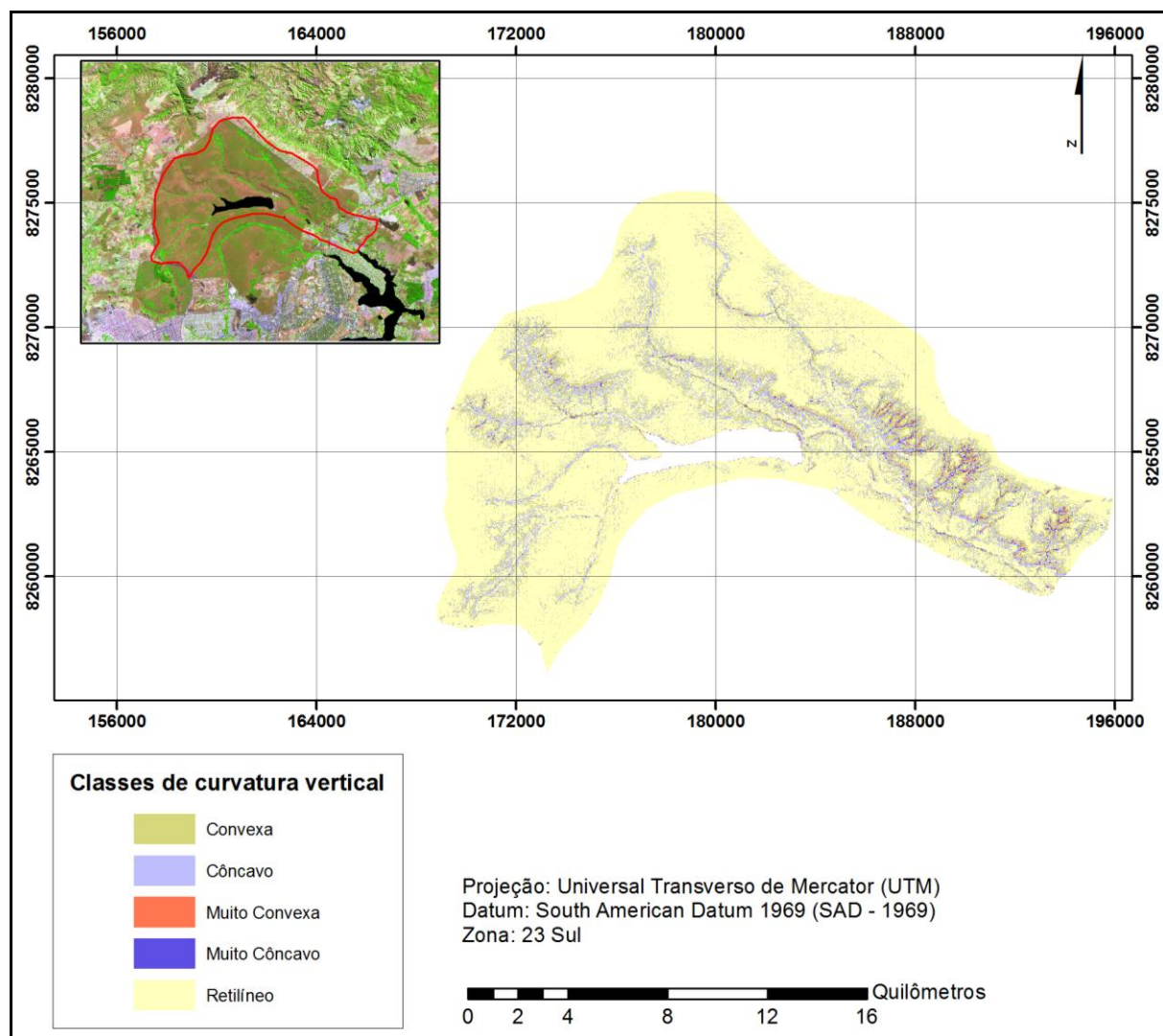


Figura 18 - Classes de curvatura vertical da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

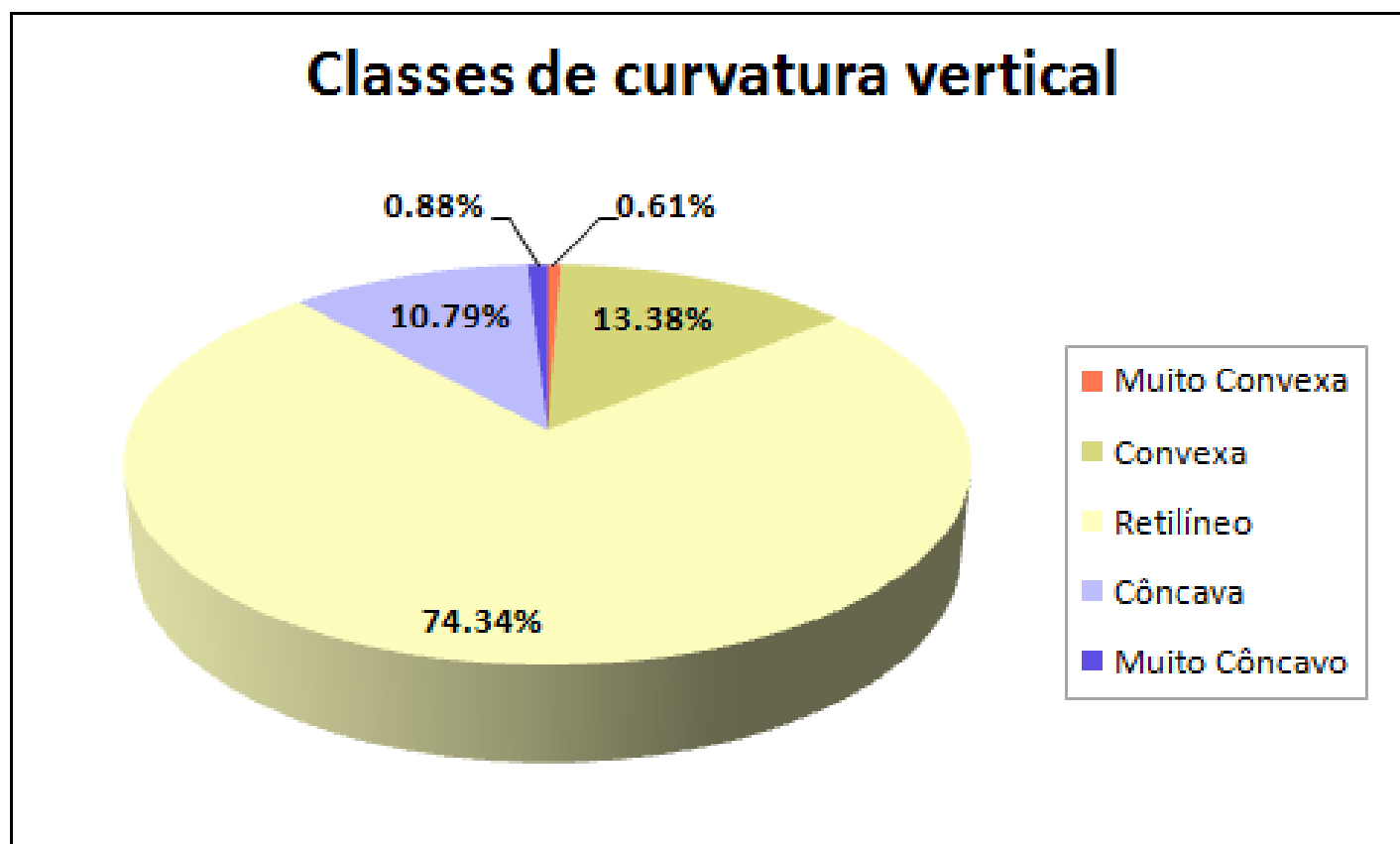


Figura 19 - Percentual da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto correspondente as classes de curvatura vertical.

4.2 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto encontra-se apresentado na figura 20. A partir da classificação supervisionada da imagem de satélite utilizando o algoritmo Bhattacharya, foi possível definir sete classes informacionais, são elas:

- a) Corpos Hídricos, constituída por lagos e lagoas, principalmente, o reservatório da barragem de Santa Maria. Deve-se salientar que não foi possível distinguir os cursos de água (rios, ribeirões, córregos) em virtude da existência de mata de galeria e da utilização de imagem com média resolução espacial, além da reduzida largura dos cursos de água;
- b) Vegetação Arbórea, composta basicamente por mata de galeria e regiões de reflorestamento;
- c) Vegetação Arbustiva, composta pela tipologia vegetal cerrado sujo;
- d) Vegetação Herbácea, composta pelas tipologias vegetais campo cerrado e campo limpo;
- e) Solo Exposto;
- f) Área Agricultada;
- g) Área Urbana

O gráfico da figura 21 mostra a distribuição das classes informacionais em função da percentagem ocupada da área total, cuja extensão é de 242,58 km² (24.258 ha). Nota-se um predomínio dos três estratos da cobertura vegetal, perfazendo cerca de 86% da área total e, conseqüentemente, contribuindo para a redução da fragilidade ambiental da unidade hidrográfica ao proteger o solo da ação erosiva das intempéries, além de melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo. Em seguida, com menor expressão territorial aparecem as classes informacionais “Solo Exposto”, “Área Urbana” e “Corpos Hídricos” com aproximadamente 5,4 %, 5,0 % e 3,2 % da área total, respectivamente.

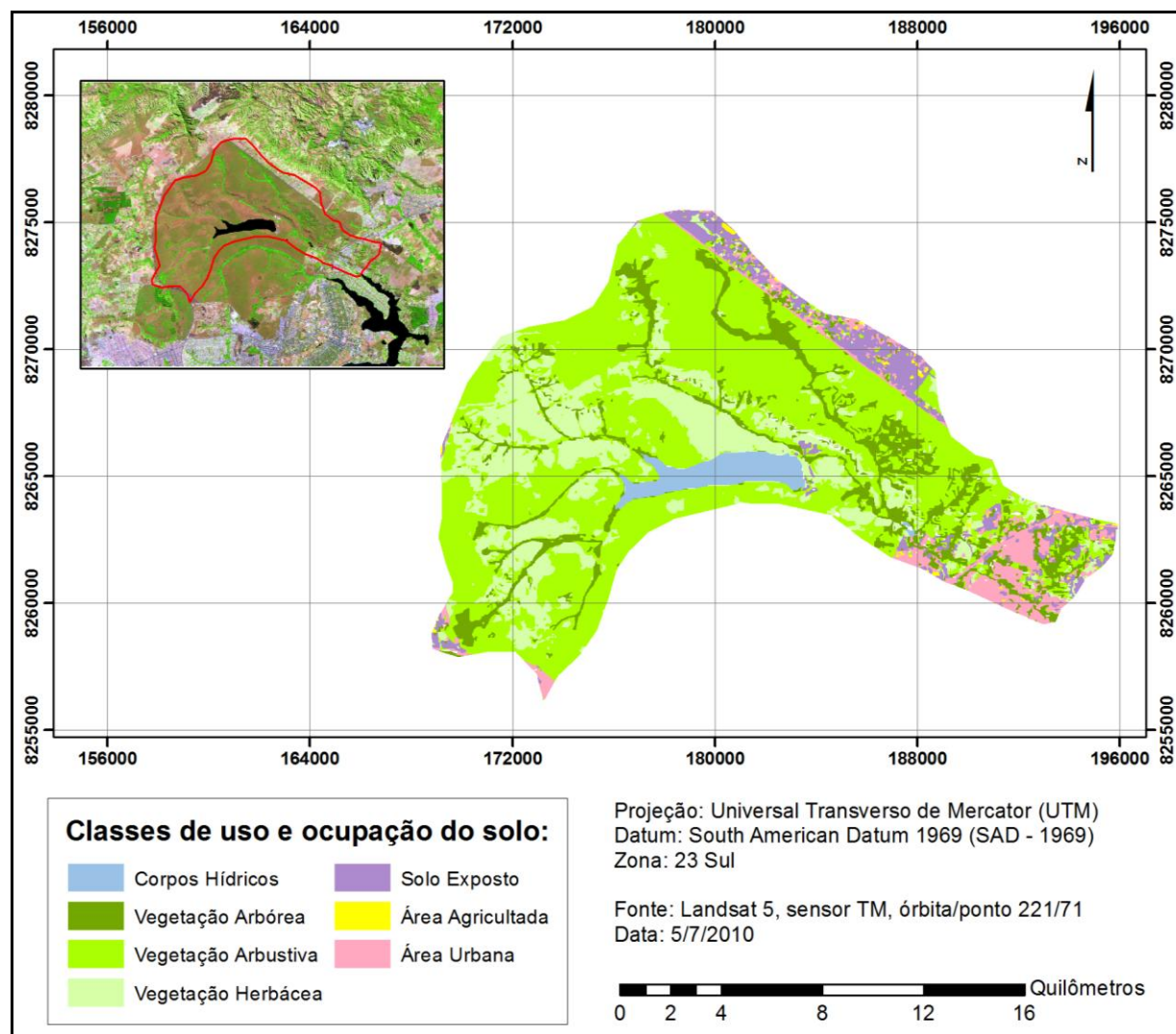


Figura 20 - Mapa de uso e ocupação do solo da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

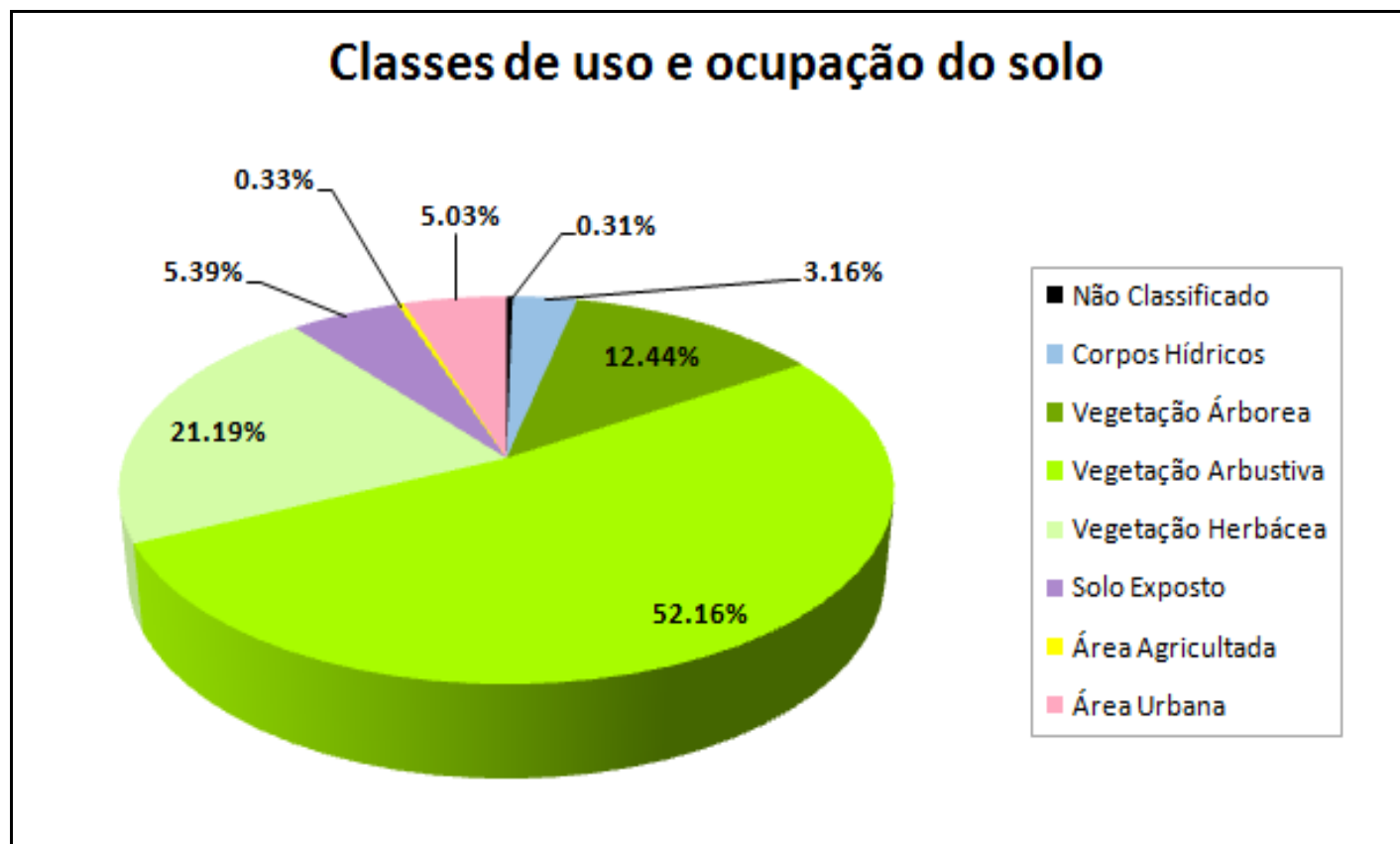


Figura 21 - Distribuição das classes informacionais da Unidade hidrográfica Santa Maria e Torto em função da percentagem ocupada da área total.

Os procedimentos pós-classificatórios, envolvendo as amostras de testes obtidas na segmentação da imagem original e a imagem classificada, permitiram a avaliação dos resultados obtidos através da Matriz da Confusão (Matriz de Erro) e de índices de exatidão (Índice de Exatidão Global, Índice Tau e Índice Kappa). Deve-se ressaltar que as amostras de treinamento são distintas das escolhidas como verdades de campo. Logo abaixo nas tabelas 17 e 18 apresentam-se a Matriz de Confusão e os Índices de Exatidão encontrados, respectivamente.

Tabela 17 - Matriz de Confusão (Matriz de Erro).

Verdades de Campo	Amostras de treinamento							
	CLASSE	Corpos Hídricos	Vegetação Arbórea	Vegetação Arbustiva	Vegetação Herbácea	Solo Exposto	Área Agricultada	Área Urbanizada
	Corpos Hídricos	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Arbórea	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Arbustiva	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
	Vegetação Herbácea	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
	Solo Exposto	0%	0%	0%	0%	100%	4,85%	6,46%
	Área Agricultada	0%	0%	0%	0%	0%	95,15%	0%
	Área Urbanizada	0%	0%	0%	0%	0%	0%	93,54

Tabela 18 - Índices de Exatidão.

Índice de Exatidão	Valor (%)
<i>Global</i>	99.84
<i>Kappa</i>	99.77
<i>Tau</i>	99.81

Diante da Matriz de Confusão e dos índices de exatidão obtidos, percebe-se que o processo de aquisição das amostras de treinamento e o desempenho do algoritmo escolhido (*Bhattacharya*) mostraram-se satisfatórios, tendo em vista que todos os valores da diagonal (percentagem de pixels que foram corretamente classificados) da referida matriz foram superiores a 85% e os valores dos índices de exatidão aproximaram-se de 100%. Entretanto observou-se que tanto a classe “Área Agricultada” quanto a “Área Urbanizada” apresentaram alguma confusão com a classe informacional “Solo Exposto” devido ao comportamento espectral semelhante entre os alvos.

Comparando-se as curvas espectrais dos alvos correspondentes às classes “Área Agricultada” e “Solo Exposto”, nota-se uma resposta espectral quase coincidente nas bandas das regiões do infravermelho próximo (banda 4) e do infravermelho médio (bandas 5 e 7), apresentando uma diferenciação significativa na resposta espectral somente na banda da região do vermelho (banda 3), na qual percebe-se uma reflectância menor do alvo identificado como “Área Agricultada”, comportamento este semelhante a regiões com cobertura vegetal.

Da mesma maneira, cotejando-se as curvas espectrais dos alvos correspondentes as classes “Área Urbana” e “Solo Exposto”, observa-se uma resposta espectral quase coincidente nas bandas das regiões do vermelho (banda 3), do infravermelho próximo (banda 4) e do início do infravermelho médio (banda 5) e, finalmente, uma pequena distinção nas respostas espectrais nas bandas das regiões do azul (banda 1), do verde (banda 2) e do final do infravermelho médio (banda 7).

4.3 – Mapas de Fragilidade Ambiental Potencial e Emergente

Os mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente reclassificados encontram-se apresentados nas figuras 22 e 23, respectivamente. As tabelas 19 e 20 mostram, respectivamente, a distribuição das classes de fragilidade ambiental potencial e emergente.

Tabela 19 - Distribuição das classes de fragilidade ambiental potencial na Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

Classes de Fragilidade Ambiental Potencial	Intervalos	Área (km²)	Área (%)
Muito Baixa	0 – 50	15.91	6.96%
Baixa	50 – 100	199.89	87.47%
Moderada	100 – 150	12.67	5.54%
Alta	150 – 200	0.06	0.03%
Muito Alta	200 - 255	0.00	0.00%

Tabela 20 - Distribuição das classes de fragilidade ambiental emergente na Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

Classes de Fragilidade Ambiental Emergente	Intervalos	Área (km²)	Área (%)
Muito Baixa	0 – 50	16.49	7.21%
Baixa	50 – 100	185.82	81.29%
Moderada	100 – 150	24.20	10.59%
Alta	150 – 200	2.08	0.91%
Muito Alta	200 - 255	0.00	0.00%

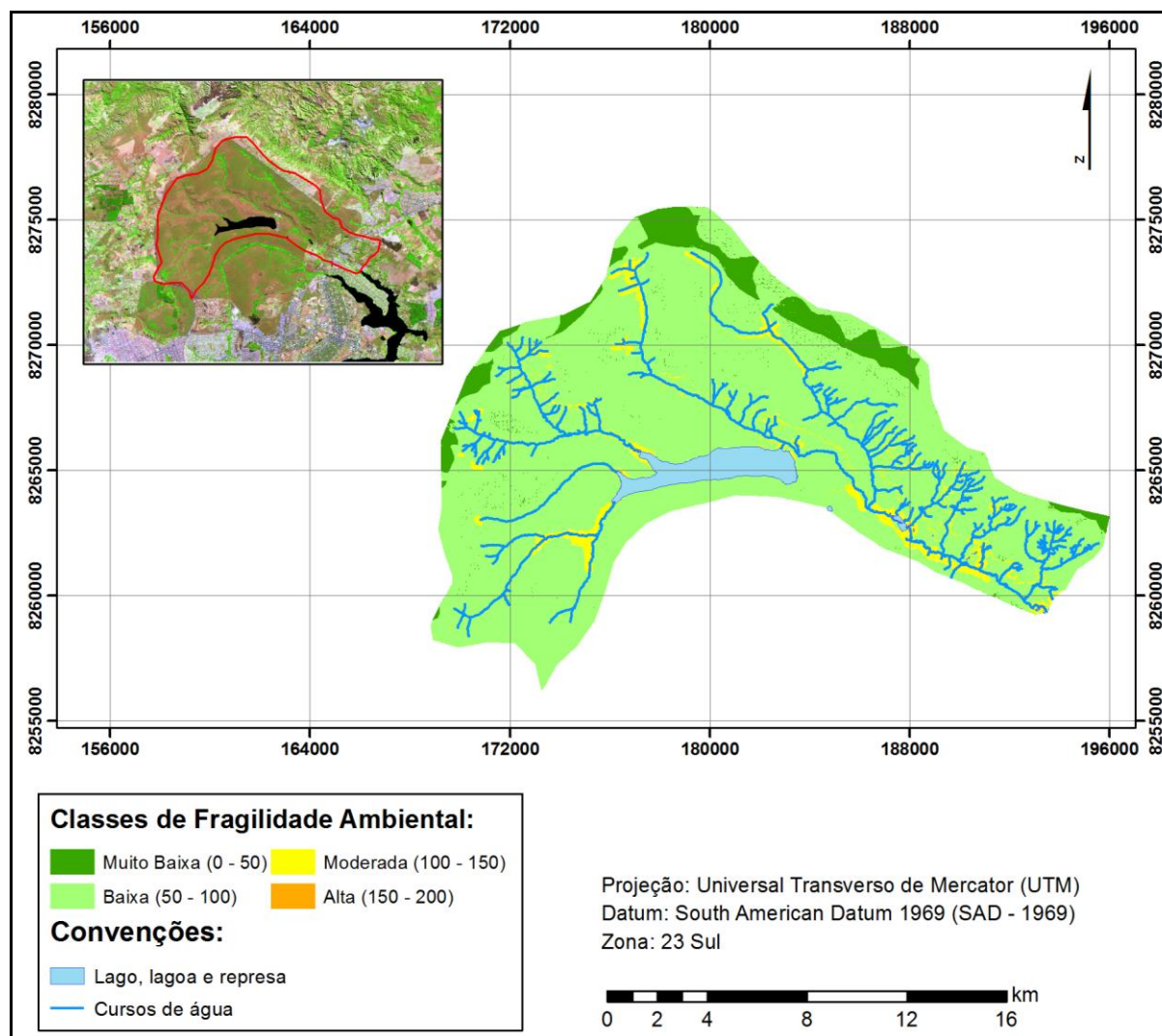


Figura 22 - Mapa de Fragilidade Ambiental Potencial.

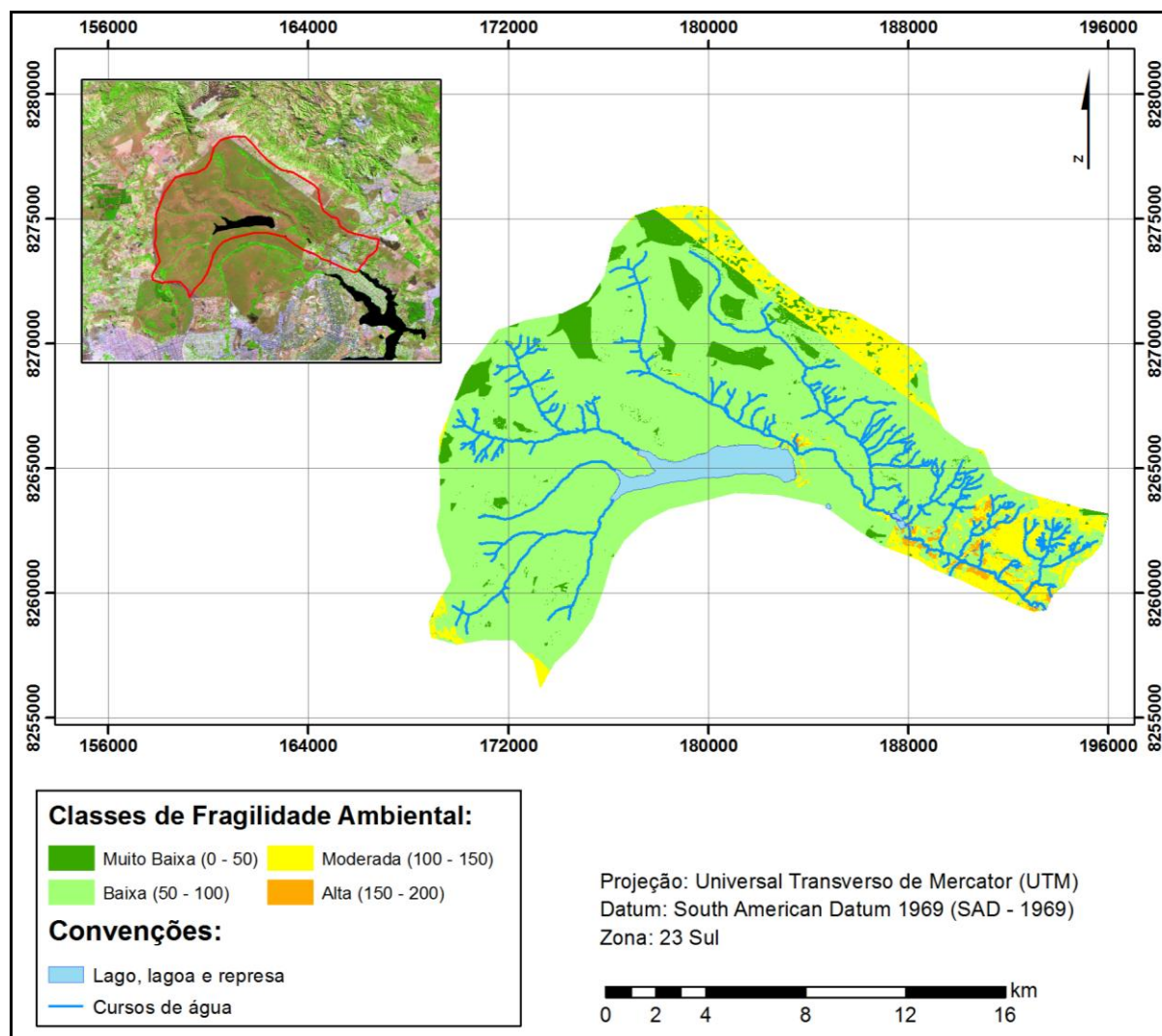


Figura 23 - Mapa de Fragilidade Ambiental Emergente.

5) DISCUSSÃO

A partir do resultado do mapa de fragilidade ambiental potencial percebe-se a esmagadora predominância das classes muito baixa e baixa, perfazendo cerca de 94,4% da área de estudo; enquanto que, as classes moderada e alta correspondem a apenas 5,6% da área da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto. Dessa forma, segundo a metodologia proposta, pode-se considerar que a área em questão apresenta baixíssima a baixa susceptibilidade natural ao desenvolvimento de processos erosivos e, conseqüentemente, menor probabilidade de ocorrência de depreciação da qualidade dos recursos hídricos superficiais.

Além disso, ao avaliar a influência dos principais fatores ambientais no resultado final do mapa, especialmente, na ocorrência das classes de maior fragilidade ambiental, nota-se que aproximadamente 90% da área das classes moderada e alta são ocupadas, simultaneamente, por solos facilmente erodíveis, unidades litoestratigráficas com maior vulnerabilidade ao intemperismo e classes de curvatura (horizontal e vertical) associadas à concentração do fluxo de escoamento. A seguir, os gráficos demonstram as constatações observadas para cada fator: solos (Figura 24), geologia (Figura 25), curvatura horizontal (Figura 26) e curvatura vertical (Figura 27).

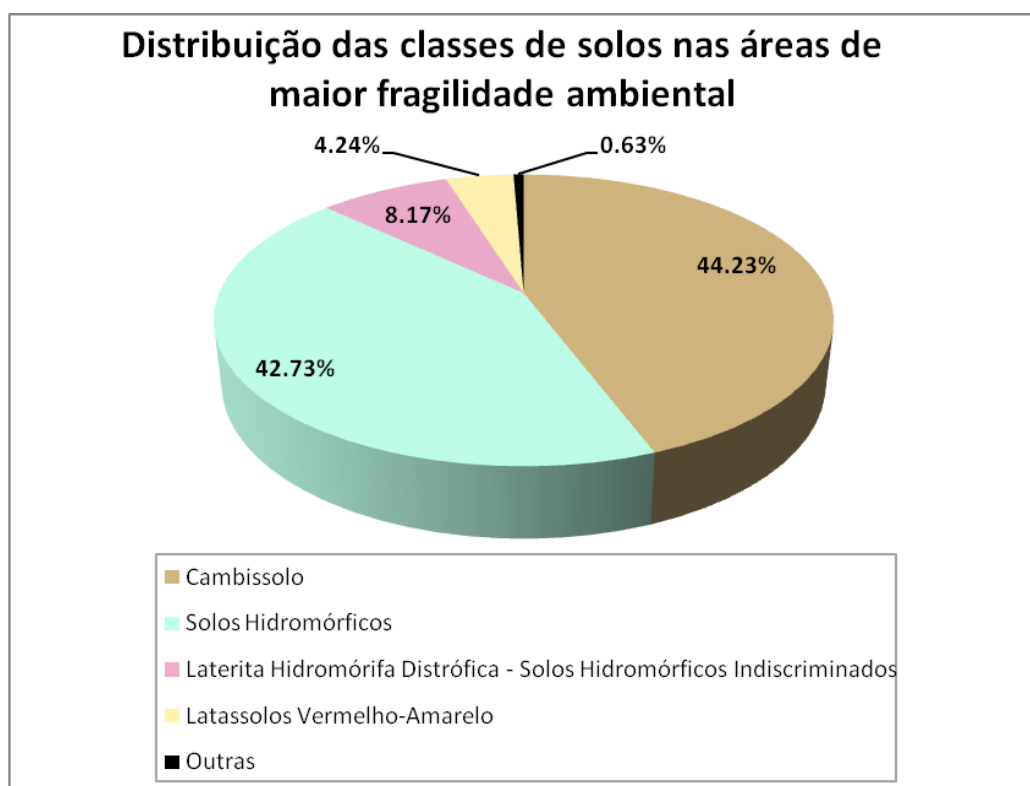


Figura 24 - Distribuição das classes de solos nas áreas de maior fragilidade ambiental.

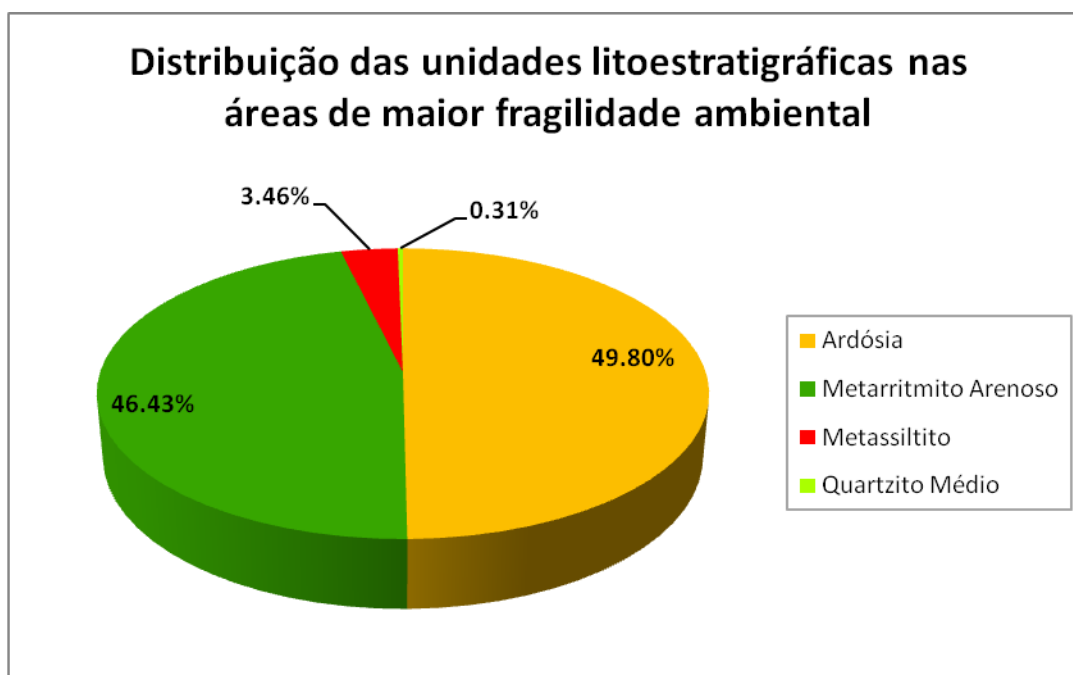


Figura 25 - Distribuição das unidades litoestratigráficas nas áreas de maior fragilidade ambiental.

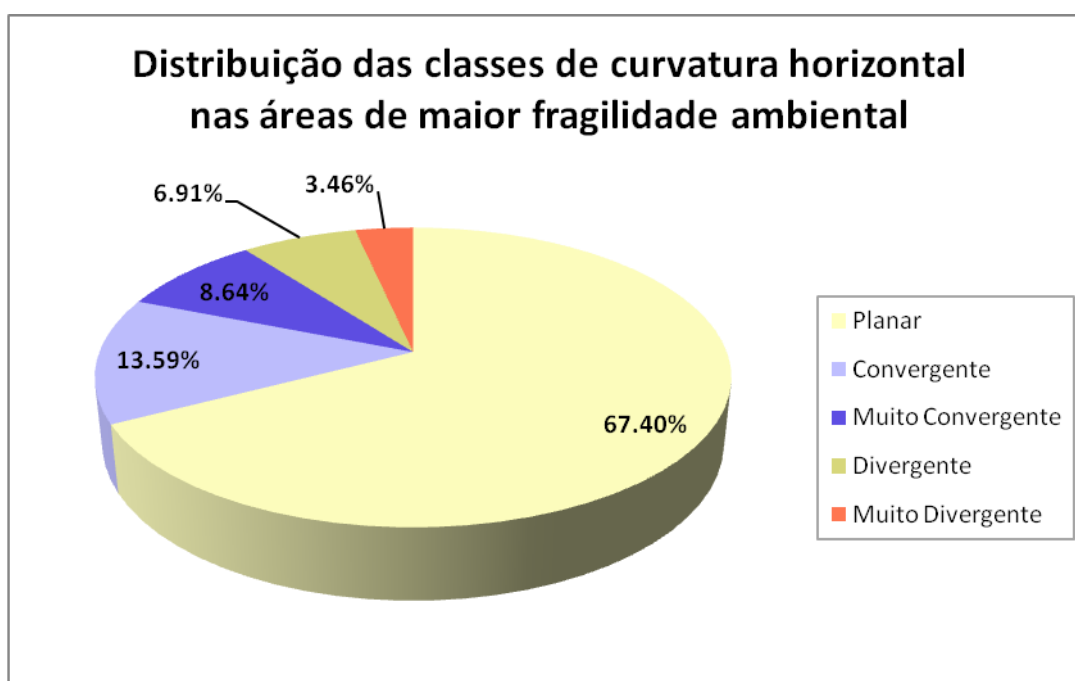


Figura 26 - Distribuição das classes de curvatura horizontal nas áreas de maior fragilidade ambiental.

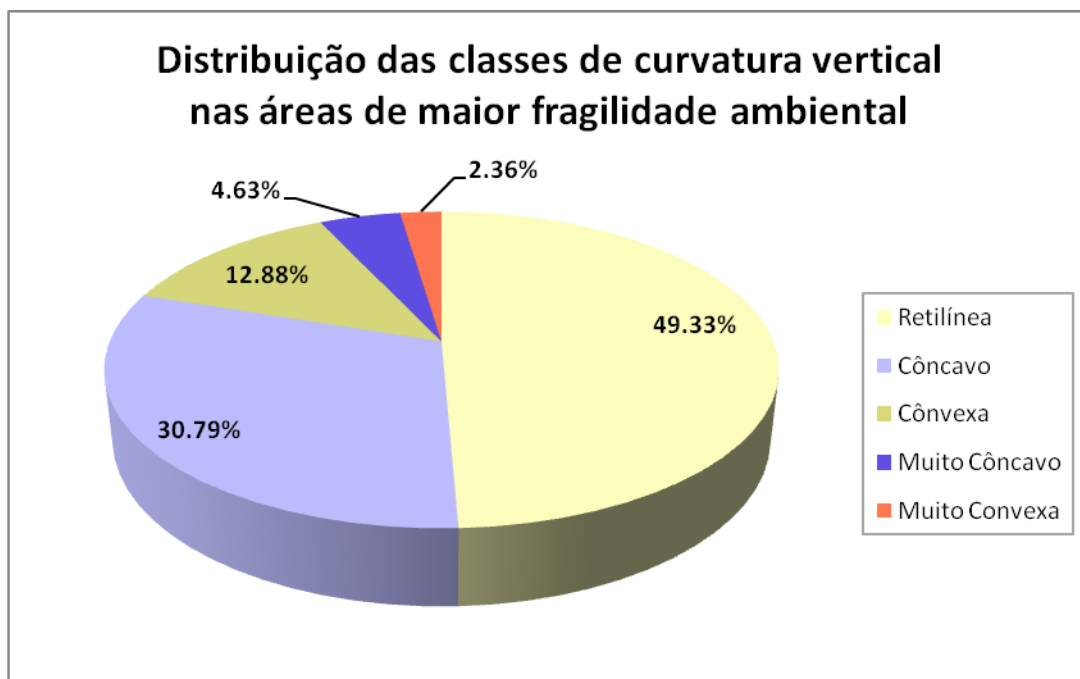


Figura 27 - Distribuição das classes de curvatura vertical nas áreas de maior fragilidade ambiental.

Com relação ao resultado do mapa de fragilidade ambiental emergente, observa-se um incremento da área das classes de fragilidade moderada e alta, fazendo com que estas totalizem cerca de 11,5% da área de estudo. Portanto, ao introduzir na análise os fatores ambientais associados a ações antrópicas (fatores “Uso e Ocupação do Solo” e “Vias Principais”) constatou-se que as áreas de maior fragilidade ambiental dobraram de extensão. Em contrapartida, a área da classe de fragilidade baixa apresentou um ligeiro decréscimo de 87,47% para 81,29% da área de estudo; enquanto que, a área correspondente a classe muito baixa encontra-se praticamente constante.

Ao analisar a influência das ações antrópicas na manutenção e melhoria da qualidade ambiental, sobretudo, no tocante a susceptibilidade ao desenvolvimento dos processos erosivos e a qualidade dos recursos hídricos superficiais para o abastecimento humano, percebe-se que 94,4% das áreas de maior fragilidade ambiental (classes moderada e alta) são ocupadas por usos e atividades que, de maneira geral, apresentam baixa cobertura vegetal, resultando em áreas desprotegidas, com menor capacidade de infiltração de água no solo e maior potencial de geração de escoamento superficial. A Figura 28 mostra a distribuição das classes de uso e ocupação do solo nas áreas de maior fragilidade ambiental.

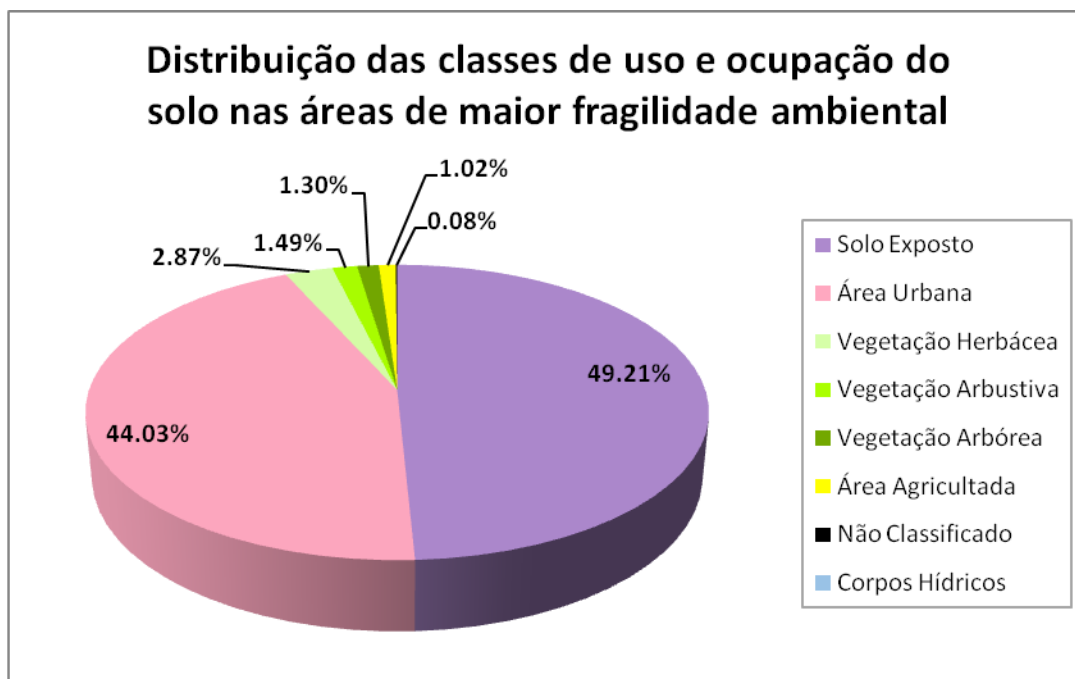


Figura 28 - Distribuição das classes de uso e ocupação do solo nas áreas de maior fragilidade ambiental (mapa de fragilidade ambiental emergente).

Finalmente, deve-se enfatizar a importância da manutenção do Parque Nacional de Brasília para a preservação da bacia hidrográfica que abastece a capital federal, tendo em vista que aproximadamente 187,8 km² (18.780 ha) ou 98,5% da área da unidade hidrográfica inserida na unidade de conservação federal apresenta baixa fragilidade ambiental. Por outro lado, observa-se que cerca de 61,8% da área da unidade hidrográfica localizada fora dos limites do parque nacional apresenta fragilidade ambiental emergente moderada a alta. Os gráficos (figuras 29 e 30) confirmam a influência do Parque Nacional de Brasília na proteção da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto.

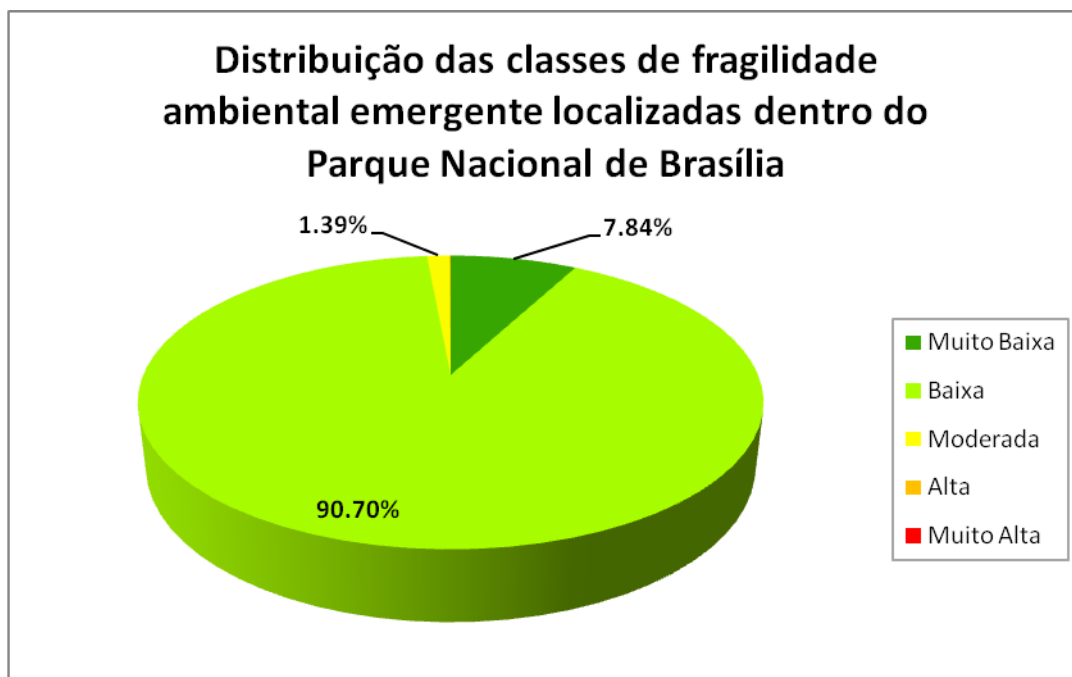


Figura 29 - Distribuição das classes do mapa de fragilidade ambiental emergente localizadas dentro dos limites do Parque Nacional de Brasília.

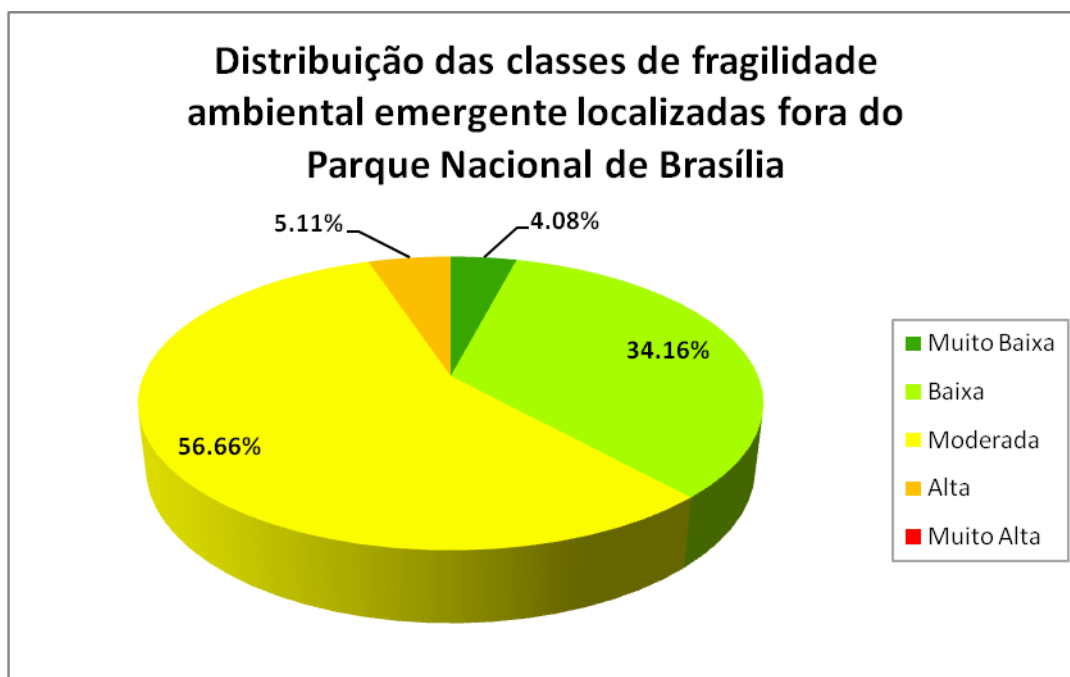


Figura 30 - Distribuição das classes do mapa de fragilidade ambiental emergente localizadas fora dos limites do Parque Nacional de Brasília.

No presente trabalho, deve-se salientar que tanto no mapa de fragilidade ambiental potencial quanto emergente não foi encontrado áreas com fragilidade muito alta.

6) CONCLUSÃO

O presente trabalho gerou mapas de fragilidade ambiental potencial e emergente da Unidade Hidrográfica Santa Maria e Torto, área de contribuição responsável pelo abastecimento público da capital federal, utilizando lógica *fuzzy* e combinação linear ponderada dos fatores ambientais. A partir dessa metodologia, pode-se concluir que, de maneira geral, a área da bacia hidrográfica apresenta baixa fragilidade ambiental, entretanto deve-se atentar para as pressões antrópicas nas bordas da unidade hidrográfica (fora dos limites do Parque Nacional de Brasília).

Além disso, os resultados da matriz de confusão do mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo demonstraram a viabilidade do uso da imagem do satélite Landsat 5 (sensor TM) para o monitoramento e pré-avaliação das ações antrópicas na região. Porém, trabalhos desse porte devem ser complementados com visitas à campo a fim de validar as observações realizadas e servir como ferramenta de gestão ambiental.

Finalmente, com vistas à melhoria no uso das ferramentas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e da metodologia utilizada, sugere-se a realização de outros estudos nessa área, atentando-se para os seguintes pontos: (i) revisão dos pesos de importância em colaboração com especialistas da área de gestão ambiental (geólogos, biólogos, engenheiros ambientais, agrônomos, pedólogos, dentre outros); (ii) utilização de imagens de alta resolução espacial; (iii) inserção de outros fatores ambientais que interferem na susceptibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos, por exemplo, direção preferencial de escoamento superficial; (iv) realização de trabalhos de campo com fins de validar os resultados obtidos dos mapas de fragilidade.

7) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. *Qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo na região de Cunha, Estado de São Paulo*. Scientia Forestalis, n.56, p.125-134, 1999.

BAPTISTA, G. M. M. (1997). *Diagnóstico ambiental da perda laminar de solos por meio do geoprocessamento. Dissertação de Mestrado*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 112p.

BARUQUI, A. M; FERNANDES, M. R. *Práticas de Conservação do Solo*. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 11, n.128, p.55 – 69, agosto, 1985. BRASIL. Ministério da Saúde. Manual prático de análise de água. Brasília: Funasa, 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 6ª edição. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

BRASIL. 1965. Lei nº 4.771/65, de 15 de setembro de 1965 – *Institui o novo Código Florestal*.

BRASIL. 1981. Lei nº 6.831/81, de 31 de agosto de 1981 - *Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências*.

BRASIL. 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 - *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*.

BRASIL. 2004. Portaria nº 518, 24 de março de 2004 - *Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências*.

BOLLMANN, H. A. Metodologia para avaliação ambiental integrada. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H. L.; BARRELA, W. (Orgs.). *Indicadores ambientais: conceitos e aplicações*. São Paulo: Educ/Comped/Inep, 2001.

CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A. M. (2008). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil. Livro online.

CARNEIRO, P. J. R.; SOUZA, M. N. *Compartimentos Geomorfológicos do Distrito Federal*. Universa. Brasília, nº 9, p. 339-350, 2001.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *IVA – Índice de qualidade de água bruta para a proteção da vida aquática*. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/44-indice-de-qualidade-de-agua-para-a-protecao-da-vida-aquatica-\(iva\)>](http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/44-indice-de-qualidade-de-agua-para-a-protecao-da-vida-aquatica-(iva)>). Acessado em: 23 de junho de 2011.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *IAP – Índice de qualidade de água bruta para fins de abastecimento público*. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/41-qualidade-de-agua-bruta-para-fins-de-abastecimento-publico-\(iap\)>](http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/41-qualidade-de-agua-bruta-para-fins-de-abastecimento-publico-(iap)>). Acessado em: 23 de junho de 2011.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Índices*. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/30-indices>>. Acessado em: 23 de junho de 2011.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *IB – Índice de Balneabilidade*. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/31-ib--indice-de-balneabilidade>>. Acessado em: 23 de junho de 2011.

CORRÊA, M. de A. *Desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para a gestão de recursos hídricos na UGRHI Tietê-Jacaré (SP)*. 2007. 233 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2007.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ FILHO, P; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. *Sensoriamento remoto geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. São José dos Campos: INPE, 2001. 103 p.

CUARTERO, A. et al. *Análises del error em modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos*. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE EXPRESIÓN GRÁFICA, XII, Badajoz, 2001.

DEPONTI, C. M; ECKERT, C.; AZAMBUJA, J. L. B. de. *Estratégia para construção de indicadores para avaliação da sustentabilidade e monitoramento de sistemas*. Revista Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável. Porto Alegre, v. 3, n. 4, out/dez 2002.

DEPONTI, C. M.; ALMEIDA, J.; FERREIRA, J. R. C. *Indicadores para avaliar a sustentabilidade em agroecossistemas*. In: V Simpósio Latino-Americano sobre Investigação e Extensão em Sistemas Agropecuários – IESA e V Encontro da Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção - SBSP, 2002, Florianópolis. Anais V IESA/SBSP. Florianópolis: IESA/ SBSP, 2002. v. 1. p. 1-21.

DOMINGUES, E. *Indicadores de Sustentabilidade para Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil*. Relatório de consultoria ao Centro Internacional de Desenvolvimento Sustentável, Fundação Getúlio Vargas e Escola Brasileira de Administração Pública. Rio de Janeiro: FGV; CIDS; EBAP, 2000.

EASTMAN, J. R. *IDRISI for Windows version 2. Tutorial Exercises*. Worcester: Clark University, 1997.

EMBRAPA Monitoramento por Satélite. LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite.

Disponível em: < <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>>. Acessado em: 23 de julho de 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal*. Rio de Janeiro, 1978. 455 p. (Boletim de pesquisa, 53).

FEDRA, K. (1993). “*GIS and environmental modeling*”. In: GOODCHILD, F. M.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Org.) *Environmental modeling with GIS*. Oxford University Press Inc., New York, EUA, 35 – 50.

GONÇALVES, T. D. (2007). *Geoprocessamento como Ferramenta de Apoio à Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado. UnB. Brasília.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Critérios para Geração de Indicadores da Qualidade e Produtividade no Serviço Público*. Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade. Brasília, 1991.

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 146 p.

ISAÍAS, F. B. (2008). *A sustentabilidade da água: proposta de um índice de sustentabilidade de bacias hidrográficas*. Dissertação de Mestrado. Centro de Desenvolvimento Sustentável, UnB. Brasília – DF. 168 p.

KAWAKUBO, et al. *Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. p. 2203 -2210.

LUZ, S. O. C.; SELITTO, M. A.; GOMES, L. P. *Medição de desempenho ambiental baseada em método multicriterial de apoio à decisão: estudo de caso na indústria automotiva*. *Gestão & Produção*, v. 13, n. 3, p. 557-570, 2006.

MACEDO, M. J. B. *A influência do uso, da ocupação e da conservação do solo na qualidade da água de abastecimento: o caso da bacia hidrográfica do Lago Descoberto*. 2004. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental) – Universidade Católica de Brasília, Brasília – DF, 2004.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. *Os indicadores como Instrumentos de Apoio à Consolidação da Gestão Participativa da Água no Brasil: Realidade e Perspectivas no Contexto dos*

Comitês de Bacia Hidrográfica. 2003. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável, UnB. Brasília – DF. 362 p.

MEIRELLES M. S. P., BUENO M. C. D., DIAS T. C. S., COUTINHO H. L. C. *Sistema de suporte a decisão para avaliação do risco de impactos ambientais em bacias hidrográficas por redes de dependência e lógica fuzzy*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII, 2005, Goiânia (GO), Brasil. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia: INPE, 2005. p. 2259-2266.

MIARA, M. A.; OKA-FIORI, C. *Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR*. R. RAÍE GA, n. 13, p. 85-98, 2007.

MONTEBELLER, C. A.; CEDDIA, M. B.; CARVALHO, D. F. de; VIEIRA, S. R.; FRANCO, E. M. *Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no estado do Rio de Janeiro*. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.2, p.426-435, maio/ago. 2007.

MORAES, I. C.; CORRÊA, E. A. *Avaliação de métodos de estimativa espacial para a interpolação de dados de erosividade em uma Bacia Hidrográfica utilizando métodos de geoestatística e técnicas de geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 3º, 2010, Cáceres – MT. Anais 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Cáceres: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2010. p. 848-857.

OCDE. *Core set of indicators for environmental performance reviews: a synthesis report by the group on the state environment*. Paris: OCDE, 1993.

ORTEGA, N. R. S. *Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a problemas da Biomedicina*. 2001. 166 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

PEJON, O. J. *Mapeamento Geotécnico Regional da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. 1992. 2v, 224p.

PEREIRA, A. A. (2010). *Avaliação da qualidade da água: proposta de novo índice alicerçado na lógica fuzzy*. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências da Saúde, UnB. Brasília – DF. 170 p.

PESCE, C. M. *Avaliação hidroambiental da microbacia do córrego Saudade, afluyente da bacia do rio Uberaba*. 2010. 37 f. Trabalho de conclusão de curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Triângulo Mineiro (Campus Uberaba), Uberaba – MG.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. *Desenvolvimento Humano e Condições de Vida: Indicadores Brasileiros*. Projeto “Desenvolvimento Humano no Brasil” (BRA/97/007). Brasília, 1998.

QUIROGA, M. R. *Estatísticas del médio ambiente em América Latina y el Caribe: avances y perspectivas*. Chile: Cepal, 2005. Series Manuales.

ROCHA, O.; PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E. 2000. *A bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento*. In: ESPINDOLA, E. L. G.; SILVA, J. S. V.; ABBDON, M. M. (Orgs.). *A bacia hidrográfica do Rio Monjolinho: Uma abordagem Ecossistêmica e a Visão Interdisciplinar*. São Carlos: RIMA, p. 1 - 16.

ROCHA, J. L. S. *Indicador integrado de qualidade ambiental, aplicado à gestão da bacia hidrográfica do Rio Jiquiriça – BA*. 2008. 87 f. Dissertação de Mestrado – Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus – BA, 2008.

ROVERATTI, J. *Flora vascular do cerrado sensu stricto do Parque Nacional de Brasília, Distrito Federal, Brasil e chave para identificação das espécies*. 2008. 93 f. Dissertação (Mestre em Botânica) – Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2008.

Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo. *Agenda 21 Brasileira*. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21brasileira.php>>. Acessado em: 1º de junho de 2011.

SEMARH (DF) – Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal. *Olhares sobre o Lago Paranoá*. Disponível em:

<<http://www.semarh.df.gov.br/semarh/site/lagoparanao/framesetsCaps/framesetCap18.htm>>.

Acessado em: 1º de agosto de 2011.

SHIELDS, D.; SOLAR, S.; MARTIN, W. *The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability*. Ecological Indicator, v. 2, n. 1-2, p. 149-160, nov. 2002.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. *Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países*. Ambiente & Sociedade, Campinas, vol. X, n. 2, p. 167-148, jul/dez. 2007.

SILVA, N. L. S. *Análise de indicadores de desenvolvimento rural no contexto da sustentabilidade*. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, PR, 2007.

SILVA, C. H. C. *Identificação das fragilidades ambientais na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, utilizando análise multicritério*. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

SIRIGATE, P.; STADLER, C. C.; OROSKI, F. I.; KOVALESKI, J. L. *Gestão da qualidade ambiental da água de mananciais de abastecimento público como estratégia de redução de custos*. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Porto Alegre, RS, Brasil, 2005.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia - ciência e aplicação*. 3ª edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

VALENTIN, E. F. D. *Modelagem dinâmica de perdas de solo: o caso do alto curso da bacia hidrográfica do Rio Descoberto - DF/ GO*. 2008. 219 f. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – DF.

VALERIANO, M. M. (2008). *Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos (SP), Brasil. Livro on line.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. (1975) *Hidrologia Aplicada*. Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo, SP, Brasil, 245 p.

VITO, M. (2007). *Avaliação do risco de contaminação de mananciais hídricos para o abastecimento: o caso da bacia da barragem do Descoberto*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB. Brasília – DF. 181p.